INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Diciembre 2013 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GENÉTICA
La función reguladora del ADN

INSECTOS SOCIALES
¿Cómo construyen sus nidos?

QUÍMICA
Nuevos materiales electrocrómicos

Ondas gravitacionales

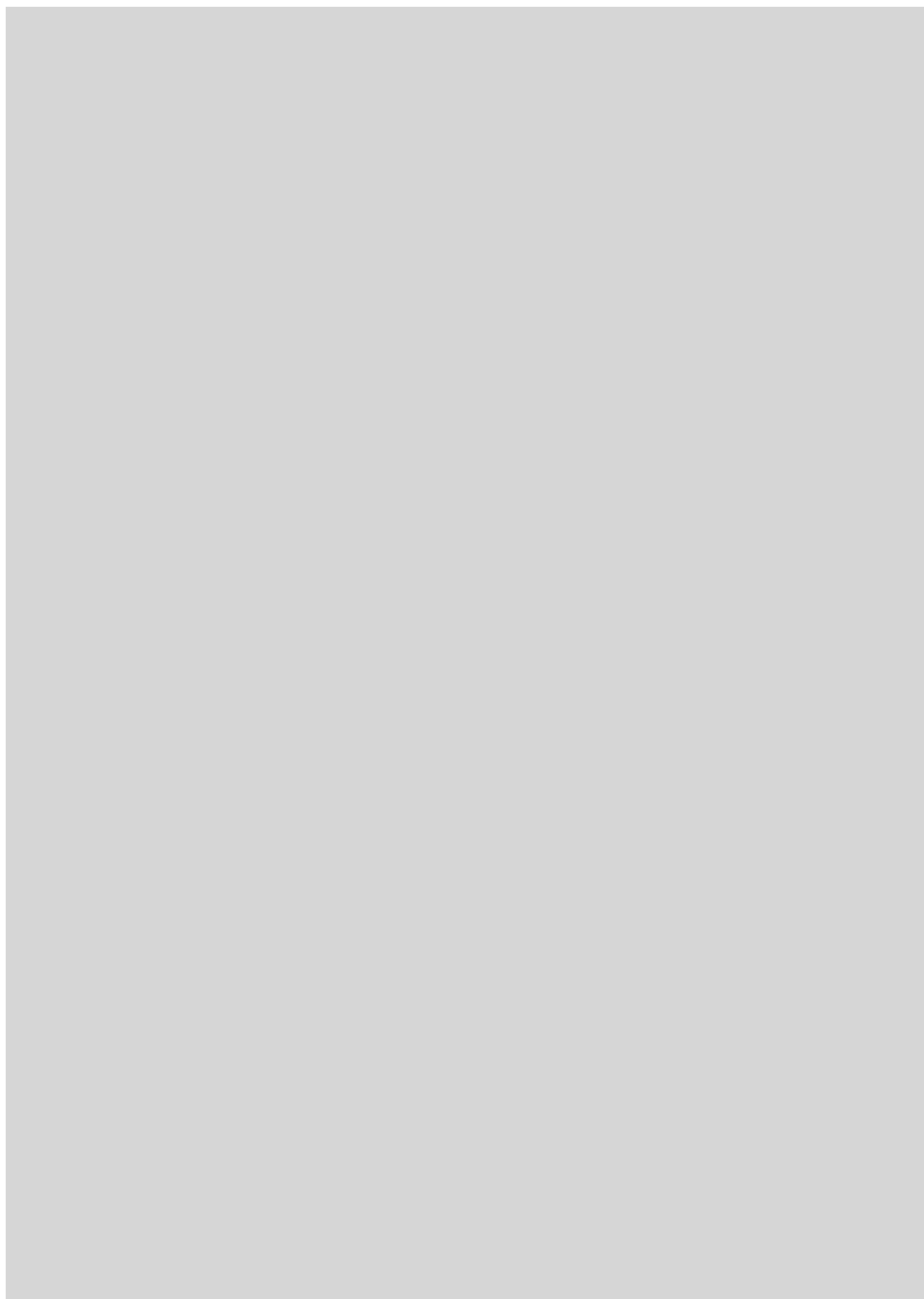
Nuevos detectores para explorar el origen del universo

INFORME ESPECIAL
2013 Estado de la CIENCIA GLOBAL

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
ONDAS GRAVITACIONALES | INSECTOS SOCIALES | MATERIALES ELECTROCRÓMICOS
DICIEMBRE 2013 N.º 447



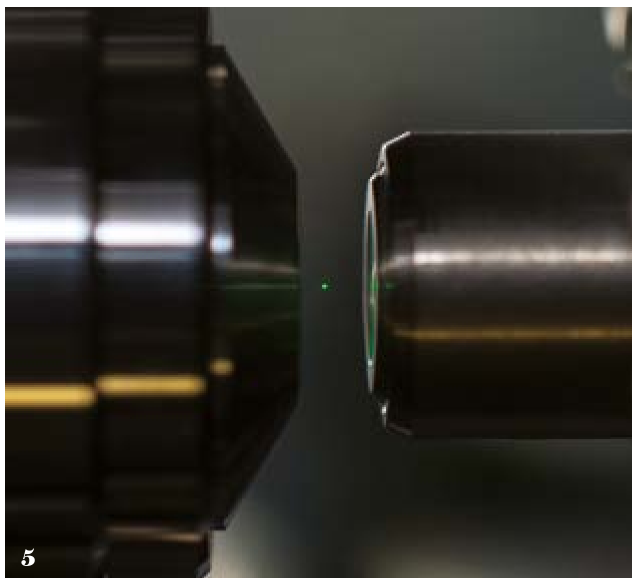
6,50 EUROS

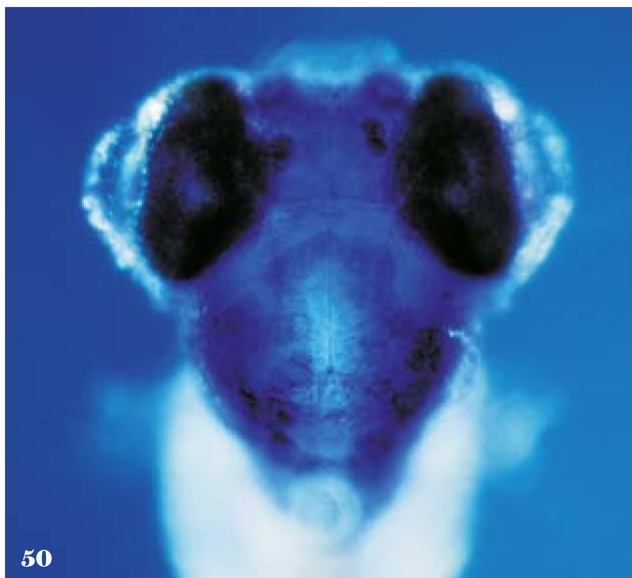


INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Diciembre 2013, Número 447


80

ARTÍCULOS


5


50


57

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Una de las predicciones más firmes de la teoría de la relatividad general son las ondas gravitacionales: distorsiones del espaciotiempo que se propagarían a la velocidad de la luz. Aunque los físicos no dudan de su existencia, detectarlas de forma directa constituye todavía una asignatura pendiente. Entre otros fenómenos, su observación permitiría estudiar la física de la primera fracción de segundo tras la gran explosión. Ilustración de Moonrunner Design Ltd.



redaccion@investigacionyciencia.es



Octubre 2013

DILEMA HISTÓRICO

Al referirse al dilema del prisionero en «Redes sociales y cooperación» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2013], Anxo Sánchez escribe: «Este dilema fue propuesto en los años cincuenta por Anatol Rapoport y Albert M. Chammah en el contexto de los estudios sobre la guerra nuclear».

Lo cierto es que ya antes, en enero de 1950, Merill Flood y Melvin Dresher, de la Corporación RAND, realizaron un experimento sobre el dilema consistente en cien partidas entre dos jugadores, Armen Alchian y John Williams. Los resultados fueron publicados por Flood en una memoria de investigación en 1952. Entremedias, en mayo de 1950, Albert W. Tucker impartió una conferencia en el departamento de psicología de la Universidad Stanford sobre teoría de juegos. A este le había llamado la atención el juego de sus colegas de la RAND, el cual le había mostrado Dresher, por lo que inventó un relato de policías y delincuentes con dilema incluido que, en una carta a Dresher, describió como: «Una versión arreglada de [un] juego como el que me mostró, con el nombre de *dilema del prisionero*». Y, como todo buen trabajo de investigación, aportó luz aclarando la cuestión y generó consecuentes.

Dicho dilema y sus variantes cuentan con antecedentes en las recomendaciones éticas de Confucio y Séneca, así como en Platón, Aristóteles y San Mateo. Posteriormente, Kant y Hobbes incidieron en él. Entre los consecuentes, el más importante tuvo lugar en 1980. Ese año, Robert Axelrod realizó varios experimentos por computador sobre el dilema del prisionero iterativo, en el que, a diferencia del juego original, hay proyección de futuro. Publicó sus resultados en el *Journal of Conflict Resolution*. En este experimento, en el que participaron 14 estrategias, resultó ganadora la estrategia *tit for tat* («donde las dan las toman»), cuyo autor era Rapoport.

Ya antes, Rapoport había trabajado y publicado bastante sobre teoría de juegos en general y sobre el dilema en particular. Sin embargo, es inexacto afirmar que fuese él quien propuso el dilema, ya que la versión original se debe a Flood y Dresher, y la iterativa, a Axelrod. Dos interesantes y documentados trabajos al respecto son *El dilema del prisionero: John von Neumann, la teoría de juegos y la bomba*, de William Poundstone (1992), y «Dilemas sociales I: El dilema del prisionero y sus variantes», de Juan Pazos (*Manuales Formativos de ACTA*, 2011).

MARÍA AURORA MARTÍNEZ REY
Universidad a Distancia de Madrid

RESPONDE SÁNCHEZ: *Gracias por recordar la historia del dilema del prisionero. Efectivamente, el dilema nace en la Corporación RAND a partir del experimento de Flood y Dresher, que luego sería bautizado por Tucker. Sin embargo, siguiendo la práctica habitual, cité a Rapoport y Chammah por tratarse de la primera fuente escrita disponible (*Prisoner's dilemma: A study in conflict and cooperation*; A. Rapoport y A. M. Chammah, University of Michigan Press, 1965). Es cierto que hay artículos anteriores de numerosos autores, incluidos muchos del propio Rapoport con diversos colaboradores, en revistas especializadas (como «Experimental games: A review», publicado en 1962 por A. Rapoport y C. Orwant en* Behavioral Science *7, págs. 1-37), pero el libro citado es la referencia clásica. Aun así, procede la aclaración. Ellos no lo propusieron, por lo que mi redacción no es la mejor.*

Confieso mi ignorancia sobre los antecedentes mencionados, pero en cuanto a los consecuentes no basta citar a Axelrod, ya que este realizó el trabajo en colaboración con el gran biólogo evolutivo William D. Hamilton («The evolution of cooperation», publicado por ambos en 1981 en Science *211, págs. 1390-1396), que ha sido considerado el mejor teórico de la evolución de la segunda mitad del siglo XX y que, muy probablemente, fue quien tuvo la idea.*

Rapoport ganó no uno, sino los dos torneos organizados por Axelrod, el segundo de los cuales se hizo disponiendo de la información del primero, y ambas veces con la estrategia tit for tat *(TFT). Las numerosas contribuciones de Rapoport a la teoría de juegos y, en particular, a los dilemas sociales en este período pionero no pueden minimizarse, pues su aportación con la estrategia TFT resultó clave para todos los trabajos posteriores, incluidas las conclusiones de Axelrod.*

Por último, es interesante apuntar que la estrategia TFT fue «derrotada» en 1993 por la conocida como win-stay, lose-shift *(«la ganadora se mantiene, la perdedora se cambia»), propuesta por M. A. Nowak y K. Sigmund en «A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner's Dilemma game», publicada en 1993 en* Nature *364, págs. 56-58.*

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Erratum corrige

Como señala nuestro lector Francesc Esteban Barbero, en el penúltimo párrafo del artículo «Ciencia y alimentación ecológica» [por J. M. Mulet; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2013] se confunden los porcentajes de caída de producción con los del incremento de tierra cultivada. La redacción correcta de la penúltima frase es, por tanto: «Si toda la agricultura del mundo fuera ecológica, necesitaríamos entre un 33 y un 100 por ciento más de tierra cultivada».

ASTRONOMÍA

La segunda vida de Kepler

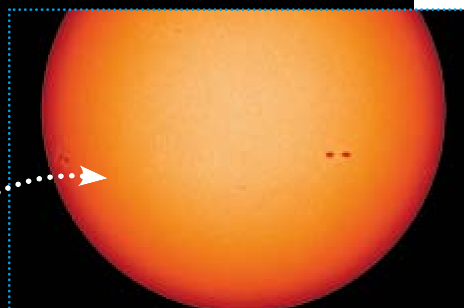
Puede que el telescopio Kepler se encuentre en horas bajas, pero aún no está acabado. El observatorio era hasta hace poco el mejor instrumento del que disponía la NASA para buscar planetas ajenos al sistema solar. Sin embargo, en mayo de este año un fallo mecánico le privó de su capacidad para apuntar con precisión a regiones concretas del cielo. Dado que un telescopio espacial constituye una herramienta demasiado preciosa para abandonarla sin más, la agencia ha solicitado nuevas ideas para reciclar el instrumento. Los expertos han acudido con más de cuarenta propuestas. Algunas plantean métodos alternativos para continuar buscando planetas, pero otras persiguen fines completamente distintos. Resumimos aquí cuatro de ellas. *—Clara Moskowitz*



MÁS ALLÁ DE LA VÍA LÁCTEA

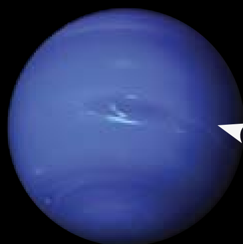
Si Kepler se orientase hacia regiones abarrotadas de galaxias, podría observar agujeros negros voraces y estrellas a punto de convertirse en supernovas. Tal vez hasta obtuviese imágenes inéditas del curso de algunas de esas explosiones. La propuesta presentada por los expertos subraya que, incluso en su estado actual, ningún proyecto existente o planeado podría estudiar las explosiones de supernova tan bien como Kepler.





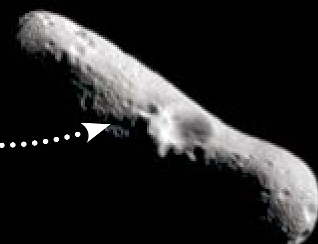
SEÍSMOS ESTELARES

Al igual que nuestro planeta sufre terremotos, también las estrellas experimentan sus propios seísmos. Estos provocan alteraciones en el brillo del astro, gracias a las cuales puede inferirse su dinámica interna. Kepler podría estudiar la astrosismología del cúmulo estelar de la Vía Láctea NGC 2244, poblado por estrellas muy calientes y de masa elevada cuyas propiedades no se conocen demasiado bien.



OLAS AZULES

El estudio de las oscilaciones de Neptuno (los ligeros cambios de brillo provocados por los ciclos térmicos que recorren su interior) permitiría deducir varios aspectos relativos a la estructura del planeta. «No es mucho lo que sabemos sobre las entrañas de los planetas gigantes», apunta Mark Marley, del Centro de Investigación Ames de la NASA.



ROCAS PELIGROSAS

Con Kepler cabría detectar más deprisa asteroides cercanos, muchos de los cuales son lo bastante grandes para provocar daños en la Tierra en caso de impacto. «Kepler podría escudriñar el interior de la órbita terrestre. Disponemos de muy poca información sobre los objetos cercanos a nuestro planeta que circulan por allí», señala Kevin Stevenson, de la Universidad de Florida Central.

CORTESÍA DE LA NASA (*Kepler*); SCIENCE SOURCE (*galaxia*); CORTESÍA DE NASA *PLANETARY JOURNAL* (*Neptuno*); AP PHOTO (*Sol y asteroide*)

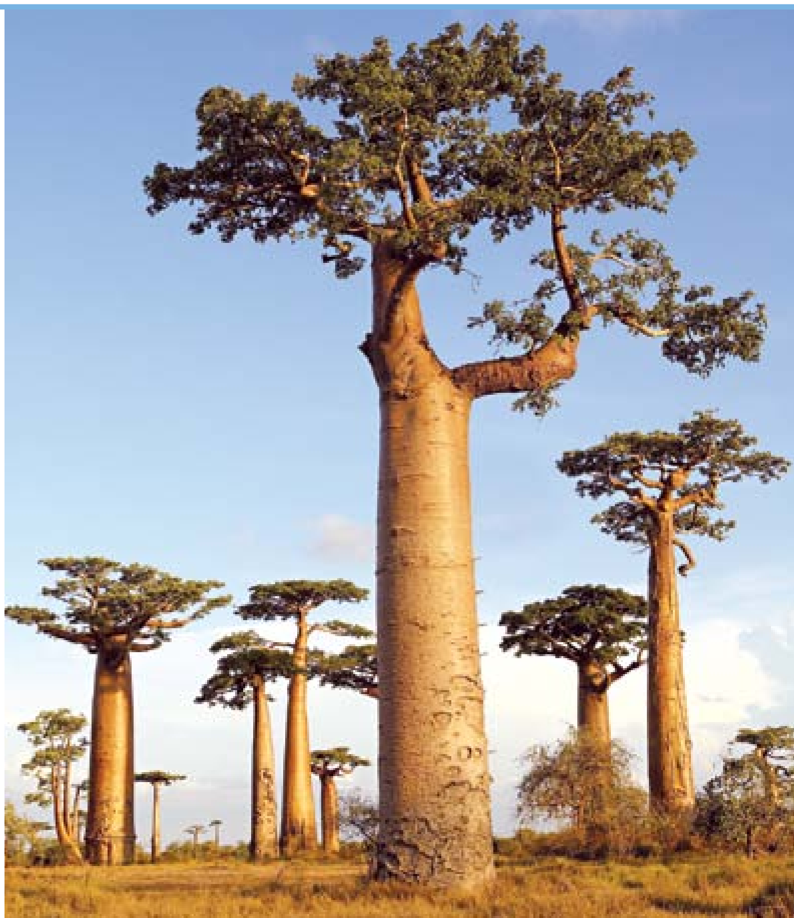
BIODIVERSIDAD

Baobabs al borde de la extinción

El pueblo eve de Togo, al igual que otros pueblos africanos, tiene un dicho: «La sabiduría es como un baobab; una persona sola no puede abarcarla». En efecto, los grandes árboles del género *Adansonia* pueden vivir más de mil años y tienen troncos de hasta diez metros de diámetro.

Seis de las ocho especies de baobab existentes en el mundo crecen únicamente en Madagascar. Sin embargo, de acuerdo con un estudio reciente publicado en *Biological Conservation*, el cambio climático y el desarrollo humano pronto acabarán con los hábitats de dos de las especies de la isla. Puede que una de ellas no sobreviva.

El baobab *A. perrieri* ya resulta muy escaso. Los autores del estudio identificaron solo noventa y nueve árboles en imágenes de satélite de alta resolución. Debido a que se halla adaptado a condiciones muy específicas, el cambio climático podría reducir su hábitat en casi un setenta por ciento hacia el año 2080. La segunda especie, *A. suarezensis*, mantiene una población de miles de ejemplares, pero con una distribución reducida. El árbol ocupa un nicho pluviométrico muy particular, lo cual, en un entorno de cambio climático, podría causar su retirada a un área de solo diecisiete kilómetros cuadrados hacia 2050. Lo que es peor, el *A. suarezensis* podría desaparecer de aquí a 2080. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza considera que estos árboles están amenazados. Ahora, quizás ambos merecen la categoría de especies en peligro crítico de extinción. —*John R. Platt*



¿QUÉ ES ESTO?



Levitando en medio de la nada, un minúsculo diamante de 100 nanómetros de diámetro brilla con fuerza bajo la luz de un láser verde. «El nanodiamante no se halla sujeto por pinzas ni por los dedos de nadie», explica Nick Vamivakas, óptico de la Universidad de Rochester. Para mantenerlo suspendido, Vamivakas y sus colaboradores emplearon un segundo láser de radiación infrarroja. Ello generó un campo electromagnético capaz de sostener la pequeña joya.

En el interior del cristal, diseñado ex profeso para el experimento, hay cientos de centros nitrógeno-vacante (NV): con ese nombre se designa a los huecos en la red cristalina de carbono que se encuentran adyacentes a un átomo de nitrógeno. Según refirieron los investigadores el pasado mes de agosto en *Optics Letters*, el láser verde excita los centros NV, los cuales emiten fotones de color rojizo por fotoluminiscencia. Su brillo resulta demasiado leve para ser apreciado por el ojo humano, pero el experimento demostró la posibilidad de manipular los estados cuánticos del interior del cristal flotante mediante láseres. Vamivakas explica que tal vez sea posible explotar las peculiaridades de la mecánica cuántica para atrapar un nanodiamante en dos lugares al mismo tiempo.

—*John Matson*

PHILIPPE MICHEL, GETTY IMAGES (*baobabs*); CORTESÍA DE J. ADAM FENSTER, UNIVERSIDAD DE ROCHESTER (*diamante*)

ETOLOGÍA

Juegos amistosos



El Centro de Conservación de Fauna de Chimfunshi en Zambia acoge docenas de chimpancés huérfanos que crecen entre coetáneos, sin la presencia de adultos. Pueden considerarse afortunados: en la selva, la orfandad es a menudo sinónimo de muerte.

Pero el crecimiento sin los progenitores no está exento de inconvenientes, por mucho que se viva en un refugio. Estudios con muy diversas especies sociales han demostrado que el desarrollo social normal depende de la presencia de individuos maduros, lo que deja en desventaja a los huérfanos.

A fin de averiguar cómo modelan los cuidados maternales las relaciones entre los chimpancés, los investigadores observaron con atención la actividad lúdica en dos poblaciones juveniles de Chimfunshi: un grupo integrado por huérfanos y otro por chimpancés criados por sus madres. Contra todo pronóstico, los huérfanos dedicaban más tiempo al juego que los segundos. «Me sentí aliviado cuando comprobamos que los huérfanos se enzarzaban en juegos sin ningún problema, puesto que esa conducta se considera un indicador de buena salud psicológica», afirma Edwin van Leeuwen, coordinador de la investigación en el Instituto Max Planck de Psicolingüística de Nimega.

Pero pese a que los chimpancés huérfanos eran juguetones, no siempre mostraban una buena actitud. La mayoría de sus niñerías no superaban los 60 segundos, mientras que los chimpancés criados tendían a jugar durante varios minutos. Es más, la conducta de los huérfanos acababa en agresión con una frecuencia cinco veces mayor, según el estudio publicado en *Animal Cognition*.

¿Qué hace que el juego de los jóvenes criados por sus madres no acabe en riña? Es posible que hayan aprendido a interpretar y utilizar las señales sutiles que mantienen un ambiente relajado. Muchos muestran conductas lúdicas, como mordisqueos y manotazos, que pueden confundirse fácilmente con una agresión, por lo que los jóvenes criados con los adultos aprenderían de estos las reglas del juego amistoso.

O tal vez la estricta supervisión de la madre desde temprana edad fije unos límites duraderos. Si esta interviene siempre que el juego se desmadra, «con el tiempo los chimpancés aprenden a refrenarse», explica Claudio Tennie, primatólogo de la Universidad de Birmingham.

La buena noticia para los jóvenes huérfanos es que todavía están a tiempo de aprender las normas sociales. Pueden acabar adquiriendo unas habilidades sociales suficientes, siempre y cuando tengan la oportunidad de vivir en libertad en un entorno amplio y adecuado, acompañados por otros congéneres. Chimfunshi alberga cuatro grupos de huérfanos rescatados y que en general parecen estar sanos, equilibrados y muestran el comportamiento característico de los chimpancés.

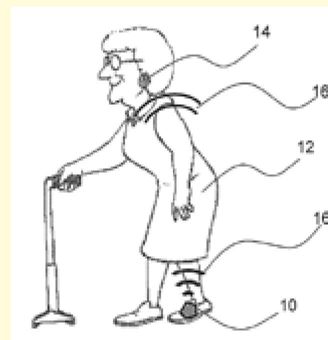
—Jason G. Goldman

PATENTES

Imagínese el lector que camina por un pasillo, cuando de repente sus piernas se niegan a dar un paso más. Hasta un sesenta por ciento de las personas con la enfermedad de Parkinson experimentan regularmente estos episodios de bloqueo de la marcha, que pueden provocar caídas y lesiones graves. «Algunos pacientes describen la sensación como tener los pies pegados al suelo», explica Emil Jovanov, profesor de ingeniería informática y eléctrica en la Universidad de Alabama en Huntsville. Los tratamientos actuales no siempre ejercen el efecto deseado, de modo que Jovanov y sus colegas están desarrollando un dispositivo para aliviar ese síntoma que funciona con señales sensoriales.

La patente número 8.409.116 describe el invento, que incluye sensores que pueden integrarse en un zapato o sujetarse en el tobillo. En cuanto el sistema detecta un bloqueo, transmite por vía inalámbrica una señal auditiva (como la palabra «camina») a un auricular, lo que incita al paciente a seguir avanzando. El dispositivo aún está en fase de desarrollo, pero los investigadores esperan sacarlo al mercado en los próximos años.

—Sophie Guterl



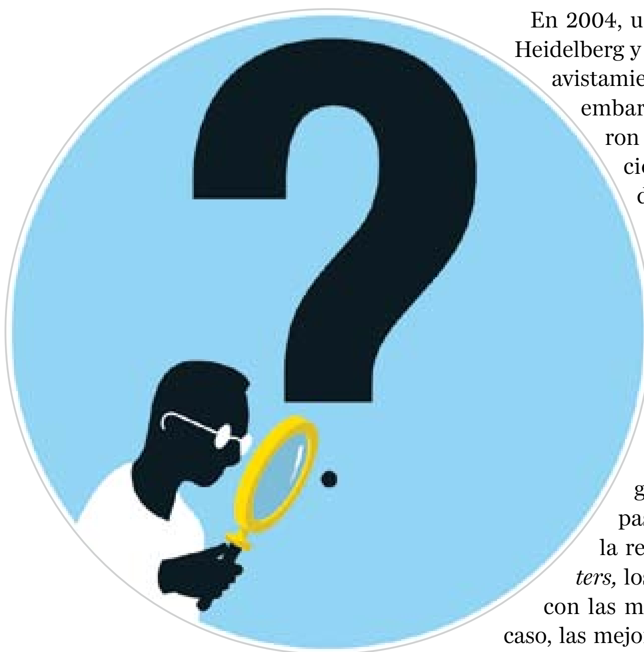
MANOJ SHAH, GETTY IMAGES (*chimpancés*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*mujer con bastón*)

FÍSICA

A la espera de los neutrinos evanescentes

Tal vez «exótico» sea un término demasiado generoso para calificar la desintegración beta doble sin neutrinos. Este proceso, por ahora hipotético, consistiría en una desintegración radiactiva acompañada de la emisión de dos neutrinos que se aniquilarían de inmediato el uno al otro. En caso existir, observarlo en una muestra que constase de un solo átomo podría suponer una espera de billones de billones de años, muchísimo más que la edad del universo.

Puede que la desintegración beta doble sin neutrinos no se dé en la naturaleza. Sin embargo, los físicos llevan años intentando detectarla por una razón: ayudaría a profundizar en los secretos de estas fascinantes partículas.



Aunque la mayoría de los experimentos de física subatómica intentan detectar partículas de una u otra clase, aquí los expertos se afanan por captar una reveladora ausencia. Se trata de una variante de la desintegración beta doble, un proceso nuclear bien conocido en el que un átomo de un elemento radiactivo se transmuta en otro (el xenón en bario, por ejemplo) y, en el curso de la metamorfosis, emite dos electrones y dos neutrinos. Según algunas teorías, neutrinos y antineutrinos serían la misma partícula. En tal caso, los dos que se emitiesen durante una desintegración beta doble podrían aniquilarse mutuamente. Por ello, los físicos buscan la misma clase de señales que caracterizan la desintegración beta doble, pero sin neutrinos.

La observación del fenómeno abriría varias líneas de investigación. «Una desintegración beta doble sin neutrinos constituiría una señal inequívoca de nueva física», asegura Carter Hall, de la Universidad de Maryland. Tal vez lo más seductor sea que, si neutrinos y antineutrinos fuesen la misma partícula, no adquirirían su masa a través del mecanismo de Higgs, como ocurre con el resto de las partículas elementales, sino mediante otros procesos cuyos detalles no se entienden bien. Además, la naturaleza dual de los neutrinos podría ayudar a entender por qué nuestro universo apenas contiene antimateria.

En 2004, un equipo experimental de Heidelberg y Moscú anunció un posible avistamiento del raro fenómeno. Sin embargo, aquellos datos no fueron corroborados por observaciones posteriores. En caso de haber detectado una genuina desintegración sin neutrinos, el experimento italiano GERDA, que intenta observar el mismo proceso en átomos de germanio, ya debería haber confirmado los resultados del grupo de Heidelberg y Moscú. Pero, según un artículo publicado el pasado mes de septiembre en la revista *Physical Review Letters,* los físicos de GERDA siguen con las manos vacías. En cualquier caso, las mejoras técnicas previstas para los próximos años otorgarán a GERDA la sensibilidad que, según muchos, permitiría detectar el fenómeno.

Al mismo tiempo, varios laboratorios estudian las emisiones de otros elementos que, al menos en teoría, también podrían sufrir una desintegración beta doble sin neutrinos. En 2012 se presentaron los datos preliminares de dos nuevos experimentos: KamLAND-Zen y EXO-200, los cuales intentan observarla en átomos de xenón. Aunque aún no han visto nada, los experimentos actuales bien podrían ser los primeros que se hallasen a las puertas de verificar o descartar el esquivo fenómeno.

—*Calla Cofield*

THOMAS FUCHS (*neutrino*); INSTITUTO DE BIOINGENIERÍA DE CATALUÑA (*tejido*)

AGENDA

CONFERENCIAS

16 de diciembre
La exploración espacial y la búsqueda de vida en el universo
Pascale Ehrenfreund, Universidad George Washington
Fundación BBVA, Madrid
www.fbbva.es

16 de diciembre
Biotecnología y crecimiento económico: la necesidad de apuestas a largo plazo
Montserrat Vendrell, Biocat
Ciclo «Desafíos del siglo xxi. La voz de los descubrimientos, innovación o transferencia del conocimiento»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

17 de diciembre
Regeneración de tejidos: como nuevo
Melba Navarro, Miguel Angel Mateos y Oscar Castaño, Instituto de Bioingeniería de Barcelona
Ciclo «Acércate a la ciencia»
Biblioteca Sagrada Familia
Barcelona
www.ibecbarcelona.eu/divulga



EXPOSICIONES

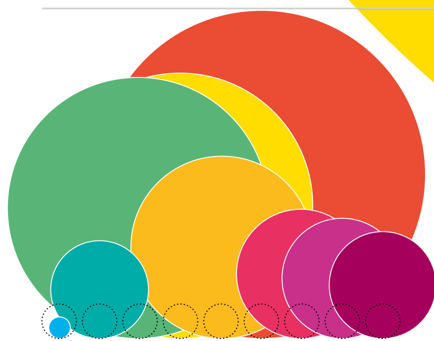
El átomo de Bohr: 100 años en órbita
Biblioteca de física y química
Universidad de Barcelona
www.ub.edu > Agenda

Mediterráneo
Cosmocaixa
Barcelona
obrasocial.lacaixa.es

OTROS

Del 26 de noviembre al 19 de diciembre
Retos energéticos: presente y futuro
Varios investigadores ICREA
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
www.cccb.org > Descubre > Conferencias y debates

14 y 15 de diciembre
Desgranando ciencia – *Evento*
Parque de las Ciencias
Granada
www.desgranandociencia.es



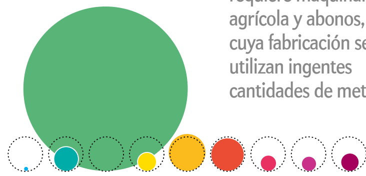
Biomasa (aceite de colza) El cultivo de colza requiere maquinaria agrícola y abonos, para cuya fabricación se utilizan ingentes cantidades de metales



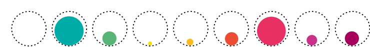
Petróleo



Solar Requiere más **estaño** y **plata** que otras fuentes, si bien en cantidades totales relativamente escasas. No obstante, consume enormes cantidades de **aluminio**: más de 1 gramo por kilovatio hora generado



Biomasa (residuos madereros)



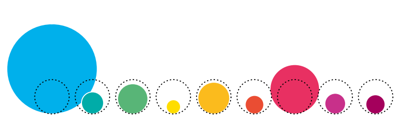
Energía hidroeléctrica



Carbón



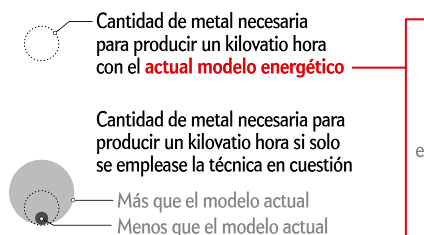
Viento La energía eólica requiere casi 10 veces más **níquel** que el que hoy demandan todas las fuentes energéticas

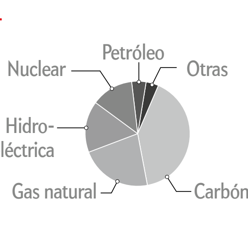


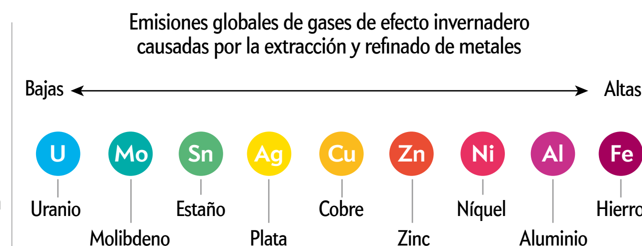
Nuclear



Gas natural







FUENTES: «METAL REQUIREMENTS OF LOW-CARBON POWER GENERATION», POR RENÉ KLEIJN ET AL., EN *ENERGY*, VOL. 36, N.º 9, SEPTIEMBRE DE 2011 (*círculos coloreados*); «ENVIRONMENTAL RISKS AND CHALLENGES OF ANTHROPOGENIC METALS FLOWS AND CYCLES: A REPORT ON THE WORKING GROUP ON THE GLOBAL METAL FLOWS TO THE INTERNATIONAL RESOURCE PANEL», POR E. VAN DER VOET ET AL. UNEP, 2013 (*emisiones de gases de efecto invernadero por metales*); ARNO GHELFI (*gráfico*)

ENERGÍA

El coste oculto de las renovables

Las fuentes de energía alternativas dependen de la extracción de metales poco beneficiosos para el entorno

Dado que la generación de calor y electricidad es responsable del 41 por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, frenar el cambio climático requerirá satisfacer buena parte de esa demanda con fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles. Sin embargo, tanto la energía solar como la eólica llevan asociadas sus propias emisiones. Según un estudio publicado en 2011 por investigadores de la Universidad de Leiden, la construcción de paneles fotovoltaicos precisa mucho más aluminio que otras técnicas. Las turbinas eólicas, por su parte, necesitan aleaciones con un alto contenido en níquel. Extraer y refinar todos esos metales exige grandes cantidades de energía.

La demanda de esos metales —y, con ella, su ya considerable huella de carbono— aumentaría de manera notable tras un eventual cambio de modelo energético. Según un estudio publicado el año pasado en el que estimaban los recursos naturales que harían falta para levantar las nuevas infraestructuras, una instalación solar de gran tamaño, por ejemplo, tardaría entre uno y siete años en compensar las emisiones de una central térmica de carbón. Una razón más para decidirse cuanto antes por el cambio de modelo.

—*John Matson*

Control genético de la formación de los dedos

Un mecanismo de tipo Turing, o de reacción-difusión, determinaría el número y el grosor de los dedos durante el desarrollo embrionario

Nuestras extremidades (brazos y piernas) comienzan a desarrollarse como pequeños abultamientos en la pared lateral del cuerpo embrionario y reciben el nombre de esbozos de extremidad. A medida que los esbozos se desarrollan, su extremo se aplana y ensancha y da lugar a la paleta digital, con forma de abanico. Las células de la paleta se organizan en bandas longitudinales de células condensadas, que originarán los dedos, separadas por bandas de células en disposición más laxa. Estas últimas constituyen los espacios interdigitales y su muerte posterior por apoptosis ocasionará la separación de los dedos.

Los factores que controlan la formación de este patrón alterno de bandas densas y laxas en la paleta digital permanecen en gran parte desconocidos. La hipótesis más aceptada corresponde al modelo de gradiente de morfógeno, el cual propone que las células reciben información sobre su posición (información posicional) a partir de la concentración de un morfógeno, una molécula generadora de forma que se difunde y establece un gradiente espacial en un campo morfogénico. El destino de las células en este campo depende de la concentración de morfógeno a la que se hallen sometidas. En el esbozo de extremidad, esta sustancia es Sonic Hedgehog (Shh), una potente molécula señalizadora que, al difundirse, crea un gradiente de concentración con niveles máximos en la parte posterior del esbozo, su lugar de producción.

Una hipótesis alternativa considera los dedos como estructuras iterativas cuya formación podría responder a un modelo de reacción-difusión. Este supone la existencia de dos sustancias, un activador y un inhibidor, que reaccionan entre sí a la vez que se difunden para acabar generando patrones de distribución estáticos. El activador promueve su propia producción y la del inhibidor, mientras que el inhibidor reprime la síntesis del activador. Partiendo de una situación inicial en la que las dos sustancias se producen de manera uniforme, las fluctuaciones al azar características de los sistemas biológicos conducen a la generación de un patrón de ondas estacionarias, con picos y valles del activador que prefiguran la morfogénesis posterior. En el caso de los dedos, los picos corresponderían a los dedos y los valles a los espacios interdigitales, si se considera un corte transversal de la mano. La longitud de onda, la separación entre dos picos consecutivos, determinaría el grosor de los dedos.

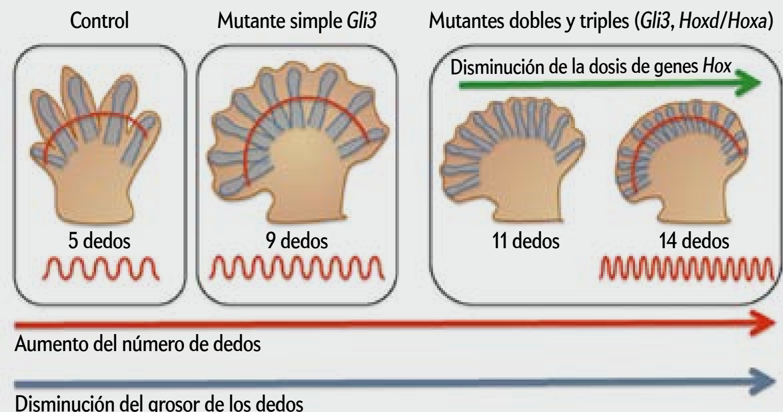
Este tipo de mecanismos autoorganizativos se conocen también como modelos de tipo Turing, ideados por el matemático británico hace más de 50 años [*véase* «La morfogénesis según Alan Turing», por J. Reinitz; Investigación y Ciencia, junio de 2012, y «Modelización en biología a través de escalas múltiples», por S. Schnell et al.; Investigación y Ciencia, mayo de 2007]. Los patrones de las rayas de las cebras, los dibujos de las caracolas y la pigmentación de los peces se explican con estos modelos. Sin embargo, y a pesar de los numerosos estudios en este sentido, la existencia de un mecanismo de tipo Turing no ha sido aceptado para la morfogénesis de los dedos. Ello se debe a varias razones. La primera, que en el caso de los dedos no se ha identificado, hasta la fecha, la naturaleza del activador ni la del inhibidor. La segunda, que no se habían hallado fenotipos que apoyaran inequívocamente el modelo, como serían los cambios en el grosor y periodicidad de los dedos. Los modelos matemáticos predicen variaciones en la longitud de onda del patrón estático final cuando se modifica el parámetro adecuado en las ecuaciones. Es decir, en la naturaleza deberían observarse fenotipos con dedos más delgados y juntos, lo que no había sucedido hasta que realizamos nuestro trabajo.

Comprobación experimental

Desde hace tiempo nos hemos interesado en identificar los factores que controlan

DESARROLLO EMBRIONARIO

Los hallazgos del trabajo que presentamos aquí defienden la existencia de un mecanismo de tipo Turing, o de reacción-difusión, para la morfogénesis de los dedos. Para demostrarlo se han realizado experimentos con ratones que presentan distintas mutaciones. Los mutantes simples para el gen *Gli3* muestran polidactilia (9 dedos). Cuando además se reduce la dosis de los genes *Hox* (*Hoxd* y *Hoxa*), el número de dedos crece hasta 14, pero sin aumentar el tamaño de la paleta digital. Los dedos son más delgados y están más juntos, pero se mantienen regularmente ordenados. Las líneas curvas rojas sobre las paletas digitales representan los perfiles donde se ha medido la intensidad de expresión de una molécula (Sox9) que marca los precursores esqueléticos (*gris*). Debajo de los dibujos de las paletas digitales se representa el patrón de ondas que esta sustancia genera, donde los picos corresponden a los dedos y los valles a los espacios interdigitales.



M. F. BASTIDA Y M. ROS

la formación y el número de dedos, incluidos los mecanismos que llevaron a la pentadactilia durante la evolución. Con este objetivo hemos trabajado con el gen *Gli3*, una de las causas principales de polidactilia en humanos y en ratones, y con algunos genes de los complejos *Hoxd* y *Hoxa*, que se expresan en la paleta digital y controlan la morfogénesis de los dedos.

Al generar en el laboratorio combinaciones de dobles y triples mutantes de esos genes, hemos descubierto que el número de dedos aumenta a medida que se reduce la cantidad de genes *Hox* en ausencia de *Gli3*. Por otro lado, la polidactilia del mutante de *Gli3* se correlaciona con un mayor tamaño de la paleta digital; es decir, en ausencia del gen *Gli3* se forma una paleta digital más grande y, al haber más tejido, surgen más dedos, aunque ligeramente más delgados. Sin embargo, al disminuir la dosis de genes *Hox*, en ausencia del gen *Gli3*, el tamaño de la paleta digital no aumenta, sino que en el mismo espacio se desarrollan más dedos. Los dedos que se forman en estos triples mutantes son mucho más delgados y están más próximos entre sí. Estos fenotipos de dedos delgados pero regularmente ordenados pueden interpretarse como el resultado de cambios en la longitud de onda de un patrón repetitivo generado por un modelo de tipo Turing. Se trata de los fenotipos que faltaban por descubrir y que se considera que apoyan este mecanismo. En realidad, nuestros fenotipos de dedos delgados y densamente empaquetados resultan muy difíciles de explicar con un modelo de gradiente de morfógeno.

Además, el análisis cuantitativo de los fenotipos y su resolución computacional con un modelo de reacción-difusión reproduce asombrosamente bien los fenotipos de nuestros mutantes. Por tanto, estos resultados, que publicamos en *Science* en diciembre de 2012, demuestran que un mecanismo de reacción-difusión de tipo Turing controla el patrón de los dedos y que los genes *Hox* son los principales moduladores de la longitud de onda, es decir, del grosor de los dedos. Queda pendiente por descubrir la identidad de las moléculas principales, el activador y el inhibidor, un tema en el que estamos investigando con especial énfasis.

Nuestros resultados también tienen implicaciones evolutivas, ya que el patrón de dedos de los ratones mutantes estudiados se asemeja en gran medida al del endoesqueleto de las aletas de los peces. Ello sugiere que un mecanismo de tipo Turing, que se ha conservado en la evolución, se hallaba ya operativo antes del desarrollo de los peces cartilaginosos.

—M.ª Félix Bastida, Marisa Junco y Marián Ros
Instituto de Biomedicina y Biotecnología de Cantabria (IBBTEC)
CSIC-SODERCAN-Universidad de Cantabria

COMPLEJIDAD

De los universos digitales a la mente

Nuevas herramientas para cuantificar nuestra intuición sobre la complejidad y el azar

Considere las siguientes cadenas binarias: 010101010101 y 101101001110. ¿Cuál de ellas le parece más compleja? Muchos diríamos que la segunda, ya que la primera sigue una pauta regular que podríamos describir como «seis repeticiones de 01». En la segunda, en cambio, no resultará tan sencillo identificar un patrón simple para describirla. Si el lector coincide con estas observaciones, entonces maneja una noción intuitiva de complejidad. Pero ¿es posible cuantificarla?

La teoría algorítmica de la información nos ofrece una respuesta. La complejidad de Kolmogórov de un objeto (también conocida como complejidad de Kolmogórov-Chaitin, o complejidad algorítmica) se define como la longitud, en bits, del programa informático más corto que lo produce. Un programa es una secuencia de instrucciones ejecutables por una computadora, algo no muy distinto de una orden como «repite seis veces 01». Pero ¿cuáles son los programas más cortos que generan 010101010101 y 101101001110, respectivamente?

En cierto modo, la longitud del programa más corto dependerá del lenguaje de programación que elijamos. Al igual que «repite seis veces 01» posee 20 caracteres en castellano pero no así en otros idiomas, algo parecido sucede con los programas informáticos. Sin embargo, ello no plantea grandes problemas, ya que puede demostrarse que las diferencias de longitud debidas al lenguaje de programación se hallan acotadas por una constante. El verdadero inconveniente con el que nos topamos es el de la incomputabilidad: no existe ningún procedimiento sistemático que permita encontrar cuál es el programa más corto que genera una cadena numérica dada.

A pesar de ser incomputable, la complejidad de Kolmogórov proporciona una noción tan poderosa y con tantas aplicaciones que merece la pena buscar un método para aproximarla. Lo más habitual suele ser emplear algoritmos de compresión sin pérdida de datos, como los programas que usamos para reducir el tamaño de una imagen digital sin que disminuya su calidad. El fichero comprimido puede interpretarse como un programa que, al ser ejecutado en una computadora, genera cierto objeto (la imagen). De esta manera, cuanto más logremos comprimir un fichero, más baja será su complejidad.

Pero la compresión presenta sus propios problemas. Uno de ellos es que no puede usarse con cadenas pequeñas, ya que, al comprimirlas, el resultado suele ser un fichero de mayor tamaño que el de partida (debido a que los programas comprimidos siempre incluyen ciertas estructuras de datos, cabeceras, etcétera). ¿Cómo medir entonces la complejidad de secuencias como 010101010101 y 101101001110?

Máquinas de Turing

En 2012, uno de nosotros (Zenil) y Jean-Paul Delahaye, de la Universidad de Lille, propusimos en *Applied Mathematics and Computation* un método alternativo a la compresión para aproximar la complejidad de cadenas binarias de poca longitud. Dicho método se basa en explorar un conjunto de programas pequeños y muy simples: las máquinas de Turing. Propuestas en los años treinta por el matemático británico Alan Turing, tales programas constituyen una versión idealizada de los rudimentos básicos que permiten a un ordenador llevar a cabo cualquier

cálculo practicable en un número finito de pasos. En el caso que nos ocupa, se trata de ejecutar todas las máquinas de Turing que posean entre 2 y 5 estados internos, además del de detención.

El conjunto formado por dichas máquinas de Turing resulta mucho más interesante de lo que podría parecer a primera vista. En primer lugar, porque las máquinas de Turing poseen un poder computacional enorme: aunque puedan llegar a resultar muy lentas, son capaces de realizar los mismos cálculos que cualquier supercomputadora. Además, generan una enorme cantidad de posibilidades: si consideramos máquinas de Turing con tan solo tres estados (además del de detención), existen 7.529.536 máquinas; con cuatro estados, 11.019.960.576, y con cinco, 26.559.922.791.424.

Gracias a los recursos del Centro Informático Científico de Andalucía, hemos logrado ejecutar todas las máquinas de Turing de hasta cinco estados y almacenar la salida que generan (por motivos prácticos, nos limitamos a aquellas que se detienen en menos de 500 pasos, lo cual comprende la práctica totalidad de las máquinas que se paran). Gracias a ello podemos conocer la frecuencia con la que, en este universo tan peculiar de programas informáticos, se obtienen distintas cadenas binarias. Así, entre las máquinas con cinco estados que se detienen, una proporción de 6465/862.157.986.084 de ellas producen el resultado 010101010101; en cambio, solo un 69/862.157.986.084 genera la cadena 101101001110. (En www.demonstrations.wolfram.com/InfiniteMonkeyTheorem ofrecemos una demostración interactiva de cómo algunas cadenas binarias son más probables que otras como resultado de un programa informático escogido al azar.)

¿Cómo obtener a partir de ahí la complejidad de cada secuencia? El teorema de codificación nos dice que la complejidad de Kolmogórov puede aproximarse por el logaritmo en base 2 de las frecuencias respectivas (cambiando, por supuesto, el signo del resultado). De esta manera, la complejidad de 010101010101 resulta ser 26,99, y la de 101101001110, notablemente mayor: 33,54. ¡La teoría y la experimentación computacional confirman nuestra noción intuitiva de complejidad!

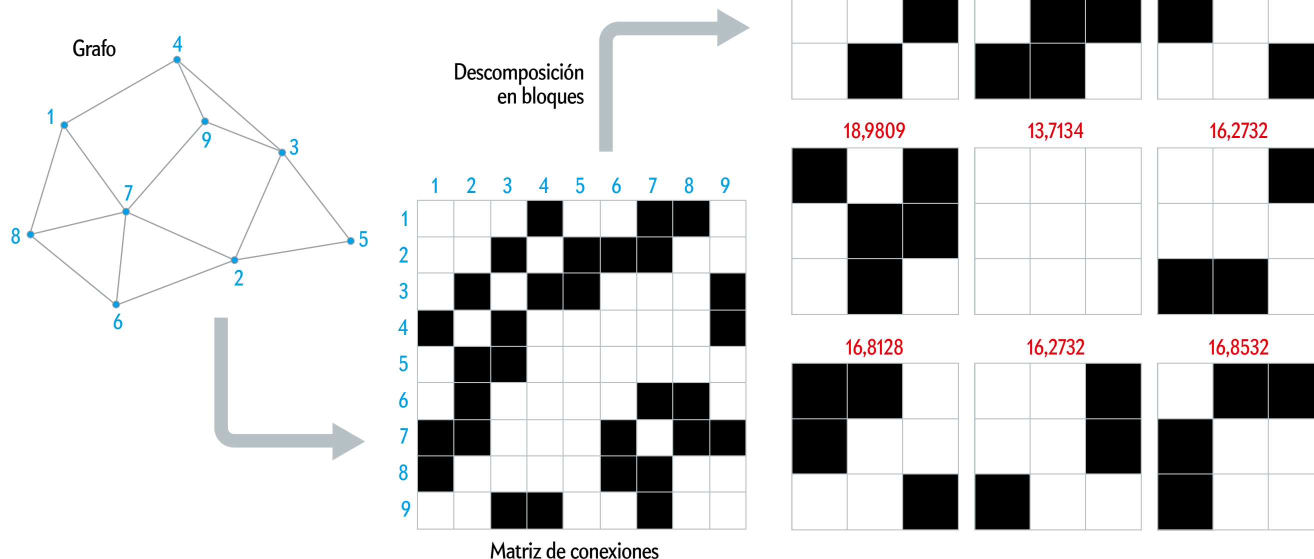
Los resultados que acabamos de exponer pueden consultarse en *The Online Algorithmic Complexity Calculator* (www.complexitycalculator.com), un proyecto en línea que permite consultar la complejidad no solo de pequeñas cadenas binarias, sino también de otros tipos. En biología, por ejemplo, resultan útiles las distribuciones obtenidas a partir de máquinas de Turing que emplean cuatro símbolos para analizar la complejidad de las secuencias de ADN. (Un resumen sobre los fundamentos de este nuevo campo de investigación aparecerá próximamente en un artículo escrito junto con Delahaye y Nicolas Gauvrit, de la Universidad de París VII, en la revista *Computability*.)

Imágenes bidimensionales

Otros objetos, como las fotografías digitales, poseen una estructura que queda mejor representada en una cuadrícula bidimensional. A fin de cuantificar su complejidad, hemos generalizado el método anterior mediante el empleo de máquinas de Turing de dos dimensiones: aquellas que, en lugar de ejecutarse sobre una cinta, lo hacen sobre un plano dividido en celdas.

Dicho procedimiento permite generar matrices bidimensionales binarias (es decir, imágenes digitales en dos dimensiones) mediante programas informáticos de poca longitud. A partir de ahí, junto con Delahaye y Gauvrit, hemos desarrollado un método de descomposición en bloques que aproxima la complejidad de Kolmogórov de una matriz mediante su división en cuadrados formados por un número reducido de celdas.

Nuestro método permite clasificar la complejidad de pequeñas imágenes de una manera más precisa que la compresión. También puede aplicarse al estudio



GRAFOS Y COMPLEJIDAD: A todo grafo puede asociarse una matriz binaria; aquella cuyos elementos c_{ij} valen 1 (*negro*) si los nodos *i* y *j* están conectados, y 0 (*blanco*) en caso contrario. Al descomponerla en bloques simples (*derecha*), la complejidad de cada uno de ellos (*rojo*) puede calcularse a partir de la frecuencia con la que cada bloque es generado por un conjunto de máquinas de Turing bidimensionales. Esta definición cuantitativa de complejidad refleja algunos de los aspectos más intuitivos de dicho concepto (por ejemplo, la complejidad de un grafo es mayor cuanto menos simetrías posee).

de la complejidad de grafos, o redes, lo que promete aplicaciones de gran interés. Un conjunto de amigos, por ejemplo, puede entenderse como una red social en la que los nodos son las personas, y los enlaces, sus relaciones de amistad. La matriz de conexiones de dicho grafo (aquella en la que el elemento c_{ij} vale 1 cuando los nodos i y j están enlazados, y 0 en caso contrario) es una matriz binaria a la que se puede aplicar el método de descomposición en bloques.

Dicha noción de complejidad muestra propiedades de gran interés que también parecen corroborar nuestra intuición: por ejemplo, cuanto más simétrico es un grafo, más baja resulta su complejidad. Además, este método puede implementarse de manera eficiente, por lo que su tiempo de ejecución compite con el de los mejores algoritmos de compresión.

¿Qué complejidad genera la mente humana?

Si pedimos a una persona que escriba una secuencia binaria aleatoria, lo más fácil será que el resultado no se asemeje a 010101010101. Pero ¿se parecerá a 101101001110, el cual ha sido obtenido mediante un generador de números aleatorios?

Existen numerosas conjeturas sobre el tipo de aleatoriedad que produce la mente humana. Sin embargo, ninguna de ellas ha podido estudiarse con las herramientas de la teoría algorítmica de la información, debido en parte a la dificultad de trabajar con cadenas pequeñas mediante algoritmos de compresión. La mayoría de los estudios psicológicos que abordan este problema desarrollan medidas de complejidad *ad hoc*, las cuales carecen de la universalidad de la complejidad de Kolmogórov.

En nuestro grupo de investigación (www.algorithmicnature.org) hemos iniciado un proyecto colaborativo que pretende estudiar la capacidad de la mente humana para generar secuencias aleatorias. Animamos al lector interesado a acudir a la página web www.complexitycalculator.com/hrng y tomar parte mediante un sencillo test de menos de cinco minutos de duración. Con gusto informaremos a los participantes de los resultados. Esperamos que las técnicas que estamos desarrollando arrojen luz sobre el tipo de aleatoriedad que genera la mente humana.

—Fernando Soler Toscano
Universidad de Sevilla
—Héctor Zenil
Instituto Karolinska
Estocolmo

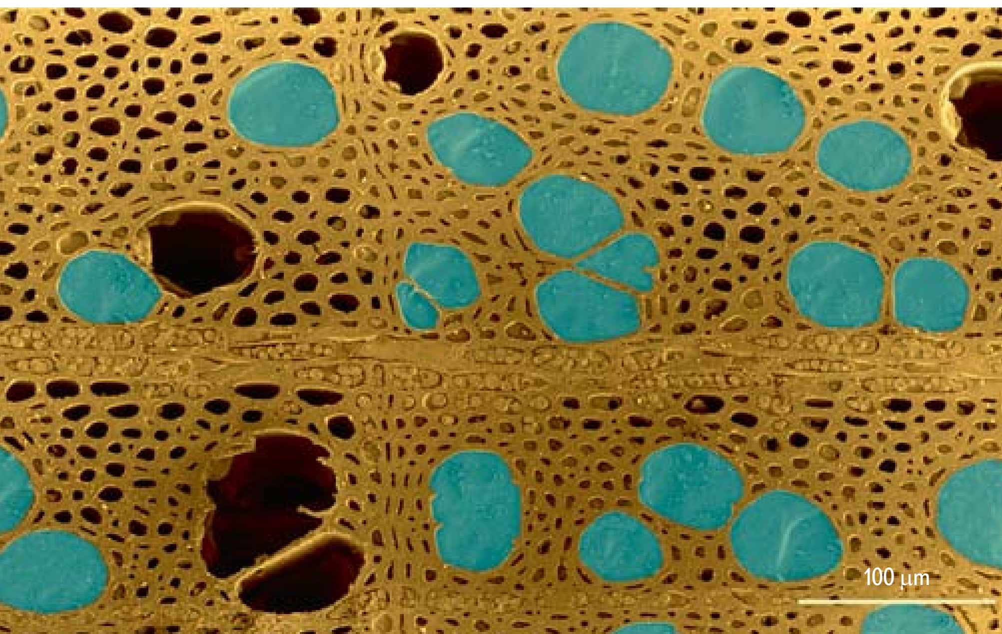
ECOLOGÍA

Fontanería forestal aplicada

A pesar de las diferencias en su sistema vascular, los árboles de distintas zonas climáticas sufren un riesgo equiparable de sucumbir ante las sequías

Cuando miramos el tronco de un árbol nos cuesta imaginar que en la madera de su interior se esconde un complejísimo sistema de microtubos análogo, en numerosos aspectos, a nuestro sistema circulatorio sanguíneo. Y sin embargo es así. Las plantas bombean continuamente enormes cantidades de agua del suelo a las hojas y de allí a la atmósfera. Globalmente, los vegetales devuelven a la atmósfera más de la mitad de los 110.000 kilómetros cúbicos de agua que caen sobre los continentes cada año en forma de precipitación. Dependiendo de las condiciones ambientales, un solo árbol puede llegar a transpirar cientos de litros de agua en un día, cantidad equiparable al consumo de agua potable de un habitante de una ciudad como Barcelona (200 litros por día).

¿A qué se deben los elevados requerimientos hídricos de los árboles? Del agua que las plantas absorben por las raíces, una fracción muy reducida es utilizada directamente en su metabolismo; la mayor parte circula por su interior y, después de evaporarse, regresa a la atmósfera. Cabe preguntarse por qué se produce este dispendio. Por un lado, el agua constituye el medio por el que los nutrientes obtenidos del suelo son transportados hasta los tejidos fotosintéticos de las hojas. Allí, las moléculas inorgánicas de dióxido de carbono (CO_2) son transformadas, mediante la energía solar, en compuestos orgánicos



CORTE TRANSVERSAL de madera de la especie *Prunus sargentii*, en la que se observan los conductos que transportan el agua en el xilema. La micrografía electrónica permite distinguir los vasos funcionales (*azul*), llenos de agua, de los embolizados (*negro*), llenos de aire.

YUZOU SANO, UNIVERSIDAD DE HOKKAIDO

(carbohidratos). Estos son distribuidos a través de la planta, de nuevo en medio acuoso, para aportar el material de construcción y la fuente de energía básica que utiliza el metabolismo vegetal.

Por otro lado, la entrada de CO_2 en las hojas se produce a través de unos pequeños poros (estomas) y conlleva la salida de enormes cantidades de vapor de agua, puesto que la molécula de agua es mucho menor y se difunde más fácilmente que la de CO_2. Las plantas necesitan transpirar continuamente si quieren seguir alimentando su metabolismo.

¿Cómo consiguen los árboles traer tal volumen de agua hasta las hojas? Responder a esta pregunta no resulta trivial, especialmente si consideramos que el transporte se realiza en contra de la fuerza gravitatoria y que algunos árboles superan los 100 metros de altura. Por fortuna, las plantas no necesitan energía metabólica para subir el agua. Es la evaporación de agua en las hojas la que genera una fuerza de succión hacia arriba que explica el ascenso de la savia. Según este mecanismo, el transporte se realiza bajo tensión y depende de la elevada cohesión entre las moléculas de agua (en estado líquido) para que la succión se propague por todo el xilema, el tejido conductor que conecta las raíces con las hojas.

Cuando el agua escasea

El mecanismo anterior suele funcionar a la perfección, pero en condiciones de sequía el sistema conductor tiene problemas para satisfacer las elevadas demandas evaporativas atmosféricas. La fuerza de succión necesaria para transportar el agua aumenta hasta el punto de que puede producirse la rotura de la columna de agua y la formación de embolias de aire, las cuales obstruyen los conductos del xilema y dificultan la circulación del agua. Si las embolias se propagan por el sistema conductor, el aire se acumula en los conductos hasta que la planta ya no puede transportar agua a las hojas, y entonces se deseca y muere. La analogía con nuestro sistema circulatorio resulta evidente. La vulnerabilidad de las plantas a las embolias depende de la estructura del xilema y es uno de los principales factores que determina la sensibilidad de las distintas especies a la sequía.

Diversos estudios han demostrado que las plantas de zonas áridas tienden a presentar una mayor resistencia a las embolias (la tensión máxima que pueden soportar sus vasos cuando el agua escasea) que las de los ecosistemas húmedos. Sorprende, por tanto, el descubrimiento reciente de que el margen de seguridad hidráulico resulte similar en las distintas especies de todos los grandes biomas de la Tierra, con independencia del clima. El hallazgo fue publicado en *Nature* en noviembre de 2012 por un equipo internacional de científicos, entre los que figura el autor. Los investigadores observaron que la diferencia de tensión entre las condiciones a las que operan normalmente las plantas y las condiciones más extremas que puede resistir su sistema vascular es aproximadamente la misma en la selva tropical y en el bosque mediterráneo. Por consiguiente, aunque el bosque tropical sea más húmedo, sus especies también resultan más vulnerables a las embolias; la disponibilidad de agua y la resistencia a la sequía se compensan de manera casi perfecta.

Como ocurre a menudo en ciencia, este resultado aclara otro fenómeno para el que no disponíamos de una explicación convincente. En las últimas décadas se ha detectado una proliferación de episodios de mortalidad y decaimiento forestal, a menudo ligados a períodos de sequía extrema. Los nuevos datos explican por qué estos episodios parecen afectar con la misma frecuencia a todos los grandes biomas de la Tierra, sea cual sea su pluviosidad.

Los bosques son sistemas dinámicos y su distribución viene determinada, en última instancia, por el clima. Al mismo tiempo, presentan una elevada resistencia al cambio; la longevidad de los árboles hace que tal cambio, cuando se produce, sea relativamente lento. Pero el calentamiento global y el consiguiente aumento de la aridez están llevando a muchos de nuestros sistemas forestales a sufrir una presión excepcional. Si queremos predecir cómo serán los bosques del futuro, o incluso saber gestionarlos para mitigar los efectos más traumáticos, necesitamos conocer con precisión los mecanismos que determinan su vulnerabilidad a la sequía. En este sentido, resulta fascinante constatar que una de las claves que determinarán la respuesta de la vegetación al cambio climático se halla escondida en la estructura de los pequeños conductos que forman la madera de los árboles.

—Jordi Martínez Vilalta
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales
Universidad Autónoma de Barcelona

SALUD

Alteraciones nocturnas

Crece el número de personas que sufren trastornos del sueño por recurrir de noche a la luz eléctrica

Son muchas las causas de que no durmamos lo suficiente: lo temprano de la escuela o el trabajo, la duración de los desplazamientos o los alimentos y bebidas con cafeína. Pero a menudo pasa inadvertida la primordial, a saber, la luz eléctrica. Sin ella, casi nadie tomaría cafeína para mantenerse despierto por la noche. Y afecta a nuestros ritmos circadianos más poderosamente que ninguna droga.

Cronobiología

El ojo desempeña varias funciones (como el oído, que cumple dos, la audición y el equilibrio). Sus bastones y conos hacen posible la visión; sus células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensibles (CGRif), dotadas del fotopigmento melanopsina, son responsables de la respuesta de la pupila a la luz, de reponer fóticamente el reloj circadiano y de otras respuestas de «visión ciega» [*véase* «Ciegos con visión», por Beatrice De Gelder; Investigación y Ciencia, julio de 2010]. La luz artificial que incide en la retina entre la caída de la noche y el amanecer siguiente ejerce, por visión ciega, diferentes efectos fisiológicos. Inhibe las neuronas inductoras del sueño, activa en el hipotálamo las orexínicas, que promueven la vigilia, y suprime la liberación nocturna de melatonina, una hormona soporífera. Estos factores reducen la somnolencia, nos mantienen alerta y trastornan nuestro dormir.

Paradójicamente, el máximo diario de energía para la vigilia, regida desde el reloj circadiano central, ubicado en el núcleo supraquiasmático (NSQ) del hipotálamo, no se alcanza al comenzar la vigilia, sino cerca de su final; ello proporciona un «segundo aliento» que nos mantiene activos al avanzar el día. Es probable que antes del uso generalizado de la luz eléctrica, este segundo aliento se experimentase a media tarde y mantuviera activo al individuo hasta caer la noche. Pero la exposición a la luz tras la puesta de sol informa al NSQ que «es de día», reponiendo «en hora» el reloj circadiano, posponiendo el «segundo aliento» y retrasando el comienzo de la secreción de melatonina. En consecuencia, son muchos los que siguen a medianoche pendientes de mensajes electrónicos, estudiando, haciendo tareas domésticas o viendo la tele, sin apenas caer en la cuenta de que están a mitad de la noche solar. La tecnología nos ha desacoplado del día natural de 24 horas hacia el que evolucionó nuestro organismo, y ha hecho que nos acostemos más tarde. Y por la mañana, recurrimos a la cafeína para empezar el día tan tempranamente como siempre hicimos, a costa del sueño.

Al parecer, cuanto más iluminamos nuestra vida, menos dormimos. La generación de luz se abarató en dos órdenes de magnitud a lo largo del siglo pasado, y su consumo creció a la par. Entre 1950 y 2000, el coste de la producción se dividió por seis y el consumo en el Reino Unido se multiplicó por cuatro. El creciente gasto de luz ha corrido paralelamente a la deficiencia de sueño.



AL ANOCHECER, la luz artificial altera nuestro reloj circadiano y, con ello, la cantidad y la calidad del sueño.

Sueño deficiente

Según un estudio publicado en 2012 en *Morbidity and Mortality Weekly Report* por Sara E. Luckhaupt, del Instituto Nacional para la Salud y la Seguridad Ocupacionales de EE.UU., el 30 por ciento de los adultos estadounidenses con empleo, y el 44 de los trabajadores nocturnos, declaran dormir menos de seis horas por noche. Hace 50 años, menos del 3 por ciento de la población adulta dormía tan poco. Otro trabajo, dirigido por Luisa Matricciani, de la Universidad de Australia del Sur, y publicado en *Sleep Medicine Reviews* en 2012, estima que, a escala mundial, durante la semana escolar los niños duermen 1,2 horas menos que hace un siglo. La mayoría de nosotros duerme a horas diferentes durante la semana laboral y los fines de semana o en vacaciones, lo que induce un «*jet lag* social» que perturba todavía más los ritmos circadianos.

El Instituto de Medicina de EE.UU. estima que entre 50 y 70 millones de es-

tadounidenses se resienten en su salud y en su seguridad laboral por trastornos o deficiencias de sueño, que, entre otros efectos adversos, suponen un mayor riesgo de obesidad, diabetes, cardiopatías, depresión y accidente vascular cerebral. Los niños, cuando no duermen lo suficiente, se tornan hiperactivos y tienen dificultad para fijar la atención, por lo que la falta de sueño puede ser confundida con un TDAH. Alrededor del 40 por ciento de la población de EE.UU. afirma que, con frecuencia, no duerme lo suficiente; un 25 por ciento informa de dificultad en concentrarse debido a la fatiga. La OMS ha incluido el trabajo en turnos nocturnos a su lista de carcinógenos conocidos o probables. Y en el tráfico rodado, la mortalidad por fatiga del conductor solo es superada por la atribuible al alcohol.

Consumo lumínico

El número de personas con deficiencia de sueño seguramente vaya en aumento. Un 19 por ciento de la producción mundial de electricidad se dedica a generar luz; muchos Gobiernos están arrinconando las lámparas de incandescencia tradicionales. Se recurre cada vez más a fotodiodos semiconductores (LED), de gran eficiencia lumínica, para pantallas de televisión, ordenadores, tabletas y otros equipos. Ello supondrá un mayor consumo de energía lumínica per cápita.

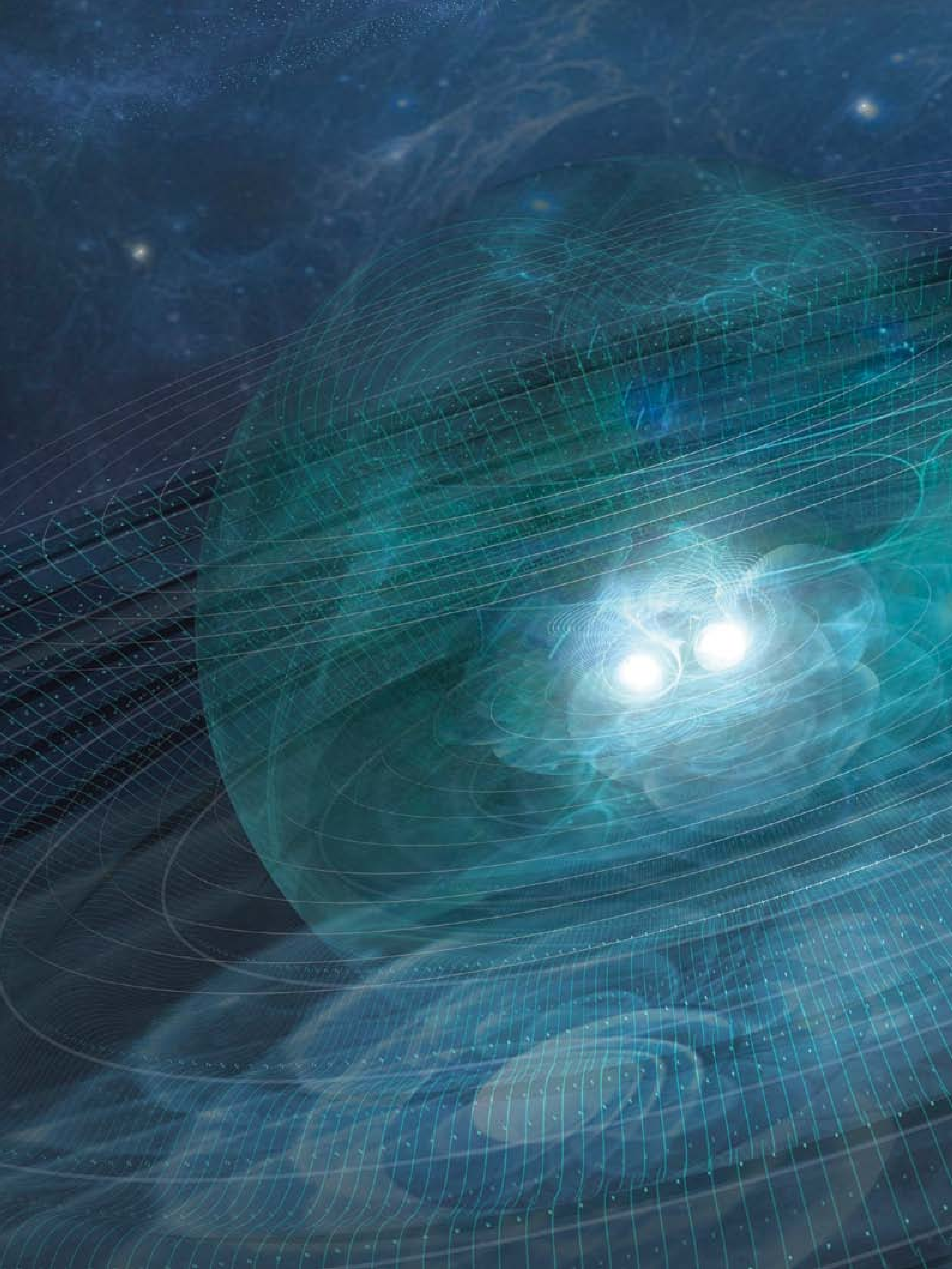
La composición de la luz es importante. La luz blanca de los fotodiodos suele ser rica en azul. Las CGRif son más sensibles a las componentes azul y verde (de corta longitud de onda), por lo que la exposición nocturna a LED perturba, más todavía que la luz de incandescencia, los ritmos circadianos, la secreción de melatonina y el sueño.

Pero la iluminación mediante fotodiodos pudiera asimismo aportar soluciones. Los apliques y lámparas de luz blanca podrían integrar LED multicolores, lo que facilitaría el control, no solo de su intensidad, sino de su composición cromática. Los efectos adversos de la luz nocturna sobre el sueño y los ritmos circadianos podrían mitigarse reemplazando, tras la puesta del sol, la luz blanca rica en azul por luz enriquecida en rojos o anaranjados. Lástima que este control del color, descubierto hace poco, se aplica a veces de forma errónea. Algunas líneas aéreas inundan de noche las cabinas de pasajeros con luz azul monocromática, el mejor color para suprimir la melatonina y dificultar el sueño.

Dormir resulta esencial para nuestro bienestar físico y mental [*véase* «Los beneficios del sueño», por Giulio Tononi y Chiara Cirelli; Investigación y Ciencia, octubre de 2013]. Es de importancia vital averiguar más sobre cómo afectan al sueño, a los ritmos circadianos, y a la salud en general, el consumo de luz y otras peculiaridades de la sociedad actual, activa las 24 horas del día. Este conocimiento ha de servir para desarrollar actuaciones, conductuales y tecnológicas, que mitiguen estos efectos perniciosos. Ya es hora de reconsiderar las tranquilizadoras proclamas de Thomas Edison, quien aseguraba que la luz eléctrica «no es en modo alguno perjudicial para la salud, ni afecta a la calidad del sueño».

—Charles A. Czeisler
División de medicina del sueño
Escuela de Medicina de Harvard
Brigham and Women's Hospital, Boston

El autor declara un conflicto de intereses debido a sus relaciones empresariales con varias compañías farmacéuticas y de electrónica.



COSMOLOGÍA

Cómo oír la gran explosión

Una futura generación de detectores de ondas gravitacionales para explorar la física del origen del universo

Ross D. Andersen

Ross D. Andersen es editor de la revista digital *Aeon Magazine*. Escribe desde hace años sobre ciencia y filosofía para publicaciones como *Atlantic* y *The Economist*.



Imagine que desea vislumbrar el principio del tiempo, los primeros instantes de la creación del cosmos.

Podría comenzar construyendo el telescopio perfecto, un instrumento tan potente que permitiese ver los confines del universo observable. Lo situaría en la cumbre de una montaña seca, lejos del resplandor de la civilización, y lo dotaría de un espejo gigante, mucho mayor que los que pueden lanzarse al espacio. Suponga que, tras una inversión de miles de millones y largos años de observación, lograse detectar hasta el último fotón a su alcance. ¿Qué joyas celestes se le revelarían?

Unas cuantas. En primer plano, distinguiría varios planetas errando a través de la red inmóvil de las constelaciones. Detrás, las estrellas más próximas aparecerían enormes sobre un fondo de diminutas manchas blancas. Cientos de millones de años luz más lejos brillarían multitud de galaxias. Y, si apuntase su telescopio ideal al lugar adecuado, aparecerían ante usted las primeras estrellas: descomunales esferas de hidrógeno y helio, cuya luz iluminaba el universo primitivo.

Sin embargo, la luz nunca podrá mostrarle todo el cosmos. Por perfecto que fuese su telescopio, jamás llegaría a ver los primeros instantes del universo. Durante los primeros cientos de miles de años posteriores a la gran explosión, los fotones se encontraban atrapados en una espesa sopa de partículas que bloqueaba la propagación de la luz. No fue sino 380.000 años después de la gran explosión cuando el universo se enfrió lo suficiente para tornarse transparente al paso de la luz. Ese primer destello liberado entonces es lo que hoy denominamos fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Si bien

EN SÍNTESIS

Los astrónomos se hallan ante el umbral de una nueva era: puede que muy pronto comiencen a detectarse las primeras señales directas de ondas gravitacionales.

Las ondas gravitacionales revelarían un universo hasta ahora oculto. Podrían también mostrar cómo era el cosmos instantes después de la gran explosión.

De cara al futuro, se han propuesto dos técnicas para construir los primeros detectores espaciales de ondas gravitacionales: una basada en láseres y otra, en átomos ultrafríos.

constituye uno de los más valiosos pilares de la cosmología moderna, es también un muro: una barrera temporal más allá de la cual no hallaremos más que oscuridad.

Durante siglos, la cuidadosa recolección de luz cada vez más antigua nos ha brindado el principal método para estudiar el cosmos. Sin embargo, hay un punto más allá del cual los fotones ya no pueden comunicar nada, con independencia de lo grandes y complejos que sean nuestros telescopios. Para atisbar más allá del muro del CMB (en los primeros 380.000 años de historia del universo), los cosmólogos han de dirigir su atención no hacia las ondas electromagnéticas, sino hacia otro fenómeno físico: la gravedad. Al propagarse, la gravedad deja tras de sí un eco de su propia difusión. Estos ecos reciben el nombre de ondas gravitacionales. Detectarlos requiere un nuevo tipo de instrumento, muy diferente de un telescopio.

LOS PRIMEROS DETECTORES

La carrera para detectar ondas gravitacionales comenzó hace décadas. Hasta ahora, sin embargo, ningún instrumento ha conseguido observarlas de forma directa. En el momento de escribir este artículo, el candidato más prometedor es el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), un proyecto estadounidense de 570 millones de dólares [*véase* «Ondas en el espacio-tiempo», por W. Wayt Gibbs; Investigación y Ciencia, junio de 2002]. Consta de tres detectores: dos en el estado de Washington y un tercero en el de Luisiana, a más de 3000 kilómetros de distancia. Cada uno de ellos constituye una maravilla de la ingeniería: una vara de medir basada en técnicas láser capaz de detectar desplazamientos del tamaño de un átomo. Su método de medición se basa en enviar dos rayos láser a lo largo de sendos brazos perpendiculares de unos cuatro kilómetros, a fin de detectar pequeñas distorsiones en la longitud de dichos brazos. Si una onda gravitacional lo bastante intensa cruza el instrumento, estirará y encogerá los brazos y su longitud relativa se modificará. El instrumento puede considerarse un auricular celeste: un micrófono gigante que aspira a revelar la sinfonía del cosmos oculto.

Al igual que otras ideas exóticas, el concepto de onda gravitacional no nació de la observación empírica, sino de la teoría. Albert Einstein fue el primero en percatarse de que las ecuaciones de su teoría de la relatividad general predecían la existencia de ondas gravitacionales. Correspondientes a diminutas perturbaciones en el espaciotiempo que se propagarían a la velocidad de la luz, tales ondas deberían generarse cuando cuerpos dotados de gran masa alcanzasen velocidades muy elevadas.

En un principio, Einstein pensó que dichas perturbaciones resultarían tan diminutas que jamás serían observadas. Sin embargo, en 1974 Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un púlsar binario que, de manera indirecta, permitiría poner a prueba las predicciones de Einstein [*véase* «Ondas gravitatorias procedentes de un púlsar orbital», por Joel Weisberg, Joseph Taylor y Lee Fowler; Investigación y Ciencia, diciembre de 1981].

Un púlsar es una estrella de neutrones (el núcleo superviviente de una explosión estelar) que rota sobre sí misma a gran velocidad y que emite pulsos de radiación electromagnética con una regularidad asombrosa. Un púlsar binario consta de un púlsar y otro objeto (en el caso del hallazgo de Hulse y Taylor, otra estrella de neutrones), los cuales orbitan uno alrededor del otro. Al tratarse de dos cuerpos tan masivos, la teoría de la relatividad general predice que deberían emitir una cantidad considerable de ondas gravitacionales. Por tanto, con el paso del tiempo, el proceso drenaría energía del sistema y haría que disminuyese la distancia entre ambos cuerpos y, con ella, el período orbital. Tras años de observaciones, se comprobó que el período orbital del púlsar binario descubierto por Hulse y Taylor no solo menguaba, sino que lo hacía a un ritmo que se ajustaba a la perfección a las predicciones de la relatividad general. En reconocimiento a la importancia del hallazgo, en 1993 ambos investigadores recibieron el premio Nobel de física.

Pero ¿cabe detectar de manera directa las ondas gravitacionales emitidas por un pulsar binario? El problema del que adolece un instrumento como LIGO es que solo puede «oír» dichas emisiones en el último momento, cuando el sistema se ha acelerado tanto y sus componentes se hallan tan próximos entre sí que el choque resulta inminente. A pesar de la enormidad del universo, los choques entre dos estrellas de neutrones u objetos similares sucede con poquísima frecuencia. Para detectar semejante proceso, habría que estar observando sin cesar una gigantesca porción del cielo. Hasta hace poco, el alcance de LIGO se limitaba a una región en la que podrían pasar siglos sin que se produjese la fusión de un púlsar binario.

En cualquier caso, la construcción inicial de LIGO puede entenderse como un ensayo general destinado a identificar y resolver los problemas de ingeniería propios de un detector de varios kilómetros de longitud. Ahora, los expertos están intentando aumentar su sensibilidad para que pueda localizar la fusión de púlsares binarios situados a 500 millones de años luz de distancia. En principio, tales mejoras permitirían observar cientos de sucesos al año. De hecho, numerosos expertos esperan que LIGO logre la primera detección directa de ondas gravitacionales pocos meses después de su nueva puesta en marcha, en 2016: cien años después de las predicciones de Einstein.

INTERFEROMETRÍA ATÓMICA

A pesar de su elevado coste, las ambiciones de LIGO son limitadas. El experimento constituye un primer paso antes de que la búsqueda de ondas gravitacionales se desplace a su entorno natural: el espacio. La superficie de nuestro planeta se revela como un lugar pésimo para tales mediciones, ya que se halla en constante agitación sísmica. Las sacudidas que sufre la corteza terrestre, incluso las más leves, pueden enmascarar con gran facilidad el ligero desplazamiento de los detectores que provocaría el paso de una onda gravitacional.

En el Centro Goddard de Vuelos Espaciales, de la NASA, dos equipos de ingenieros investigan cómo colocar un detector de ondas gravitacionales en el espacio. El más veterano de ellos lleva décadas intentando refinar el diseño de la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), un proyecto cuyo nivel de precisión supera con mucho al de LIGO. En caso de materializarse, LISA constaría de tres satélites que, en órbita alrededor del Sol, formarían un triángulo equilátero de cinco millones de kilómetros de arista. Una vez allí, medirían de manera constante la distancia que los separa mediante rayos láser. Al paso de una onda gravitacional, el espacio se deformaría y la distancia entre los vértices del triángulo cambiaría; un efecto que los láseres podrían cuantificar.

El diseño básico de LISA no ha cambiado mucho desde que sus proponentes esbozasen el primer esquema en una servilleta de papel hace más de treinta años, durante un congreso de la NASA. Sin embargo, ha ido refinándose conforme los ingenieros se percataban de los enormes retos prácticos que supondría hacerlo realidad. Hacia finales de los noventa y principios de este siglo, LISA se perfiló como uno de los proyectos bandera de la NASA, por detrás del Telescopio Espacial James Webb

(JWST, por sus siglas en inglés). En los años siguientes, sin embargo, el JWST acaparó la mayoría del presupuesto de la agencia estadounidense. Dada además la ausencia de detecciones en LIGO, sus partidarios no lo han tenido fácil a la hora de promover una empresa de miles de millones de dólares. Hoy por hoy, bien podrían transcurrir diez años antes de que vea la luz verde. (En un inicio, LISA fue concebido como una misión conjunta de la NASA y la Agencia Espacial Europea. Ante el freno de la colaboración estadounidense, la ESA trabaja ahora en un rediseño del proyecto.)

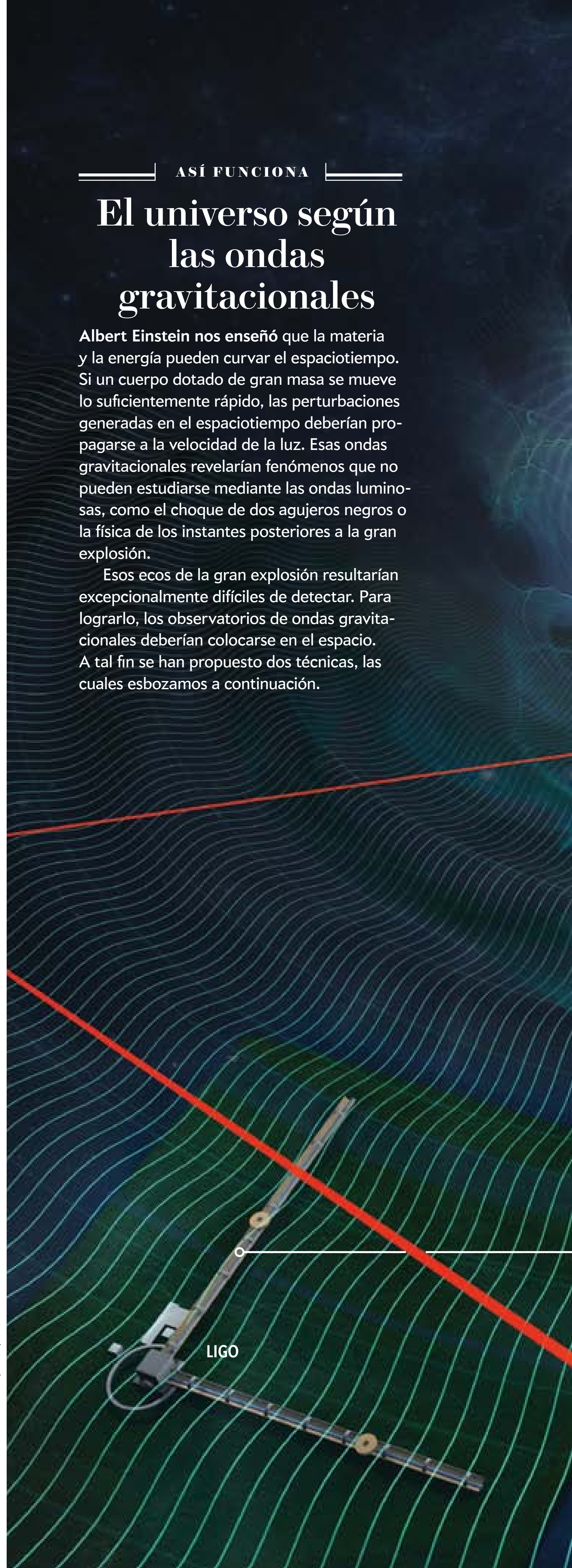
Esos retrasos dejaron un hueco en los proyectos de la NASA para detectar ondas gravitacionales desde el espacio. Con todo, un pequeño equipo de la División de Conceptos Avanzados de la agencia ha comenzado a desarrollar un nuevo tipo de sensor gravitacional basado en una técnica incipiente: la interferometría atómica. El grupo muestra una organización muy poco rígida, y no puede decirse que su trabajo constituya hasta ahora una auténtica misión. Sus dos líderes, Babak Saif, ingeniero de interferometría del JWST, y Mark Kasevich, profesor de física aplicada de Stanford, están embarcados en otros proyectos, pero dedican a este parte de su tiempo.

El pasado mes de febrero visité a Saif en uno de los laboratorios de láseres del Centro Goddard. Allí el investigador ha comenzado a construir un interferómetro atómico, el cual espera que le sirva como base para diseñar un detector de ondas gravitacionales distinto de LISA. Goddard, uno de los laboratorios de investigación espacial más prestigiosos del mundo, acoge a expertos con rancios pedigríes científicos. Los orígenes de Saif, sin embargo, son más humildes. Tras emigrar a EE.UU. desde Irán con 17 años, su familia se asentó en Virginia, donde empezó a asistir a clases de ciencia y matemáticas en una escuela universitaria local mientras trabajaba por las noches en una gasolinera. En 1981 ingresó en la Universidad Católica Americana con una beca, y en los años siguientes logró dos doctorados. Antes de recalar en Goddard, pasó diez años en el Instituto de Ciencias de Telescopios Espaciales, donde diseñó el interferómetro que pondrá a prueba los espejos del JWST. El interferómetro de Saif asegurará que la alineación de los espejos guarde una precisión de nanómetros, a fin de evitar el fiasco del telescopio espacial Hubble, que en su día fue puesto en órbita con un espejo descolocado.

Al igual que en LISA, la idea de Saif y Kasevich también se basa en medir distancias empleando para ello naves espaciales en órbita. No obstante, mientras que LISA detectaría las ligeras variaciones de la distancia que separa los satélites cruzando rayos láser, la idea de Saif y Kasevich se basa en usar nubes de átomos ultrafríos situados justo en el exterior de las naves. Dado que la técnica mide la distancia entre las nubes atómicas, y no entre las naves, los «brazos» del experimento podrían ser unas 5000 veces más cortos que los de LISA. La ventaja de la nueva técnica radica en su gran precisión. Si una onda gravitacional modificase la distancia entre las naves en una billonésima de milímetro, el interferómetro atómico aún detectaría la diferencia.

No todos se muestran tan entusiasmados con la idea. Los límites presupuestarios han generado tensiones entre los proponentes de la interferometría atómica y los partidarios de LISA. Ambas misiones resultan similares en varios aspectos: las dos se basan en técnicas interferométricas y ambas exigen una coordinación muy precisa entre las naves. Pero, según Saif, su dispositivo de interferometría permitiría reducir costes, aumentar la sensibilidad y reducir enormemente la distancia entre las naves.

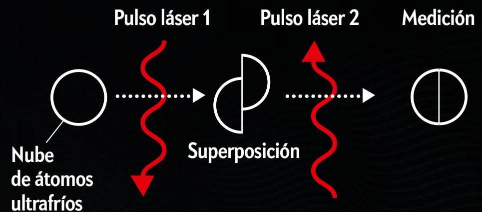
JEN CHRISTIANSEN (*insertos*)



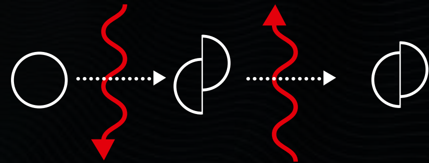
Interferometría atómica

Una nueva propuesta para medir ondas gravitacionales se basa en el empleo de nubes de átomos ultrafríos colocados en el exterior de dos naves separadas una distancia de unos 1000 kilómetros. Primero, los rayos láser ponen cada nube en una superposición de dos partes con distintas velocidades. Diez segundos después, otro láser invierte el proceso, de manera que las dos porciones se unen de nuevo. Cuando las nubes atómicas vuelven a solaparse, son medidas por más láseres. Si durante los 20 segundos que dura el proceso una onda gravitacional pasa entre las dos naves, la distancia entre las nubes sufrirá un cambio minúsculo que se reflejará en una modificación medible del estado final de los átomos.

SIN ONDA GRAVITACIONAL

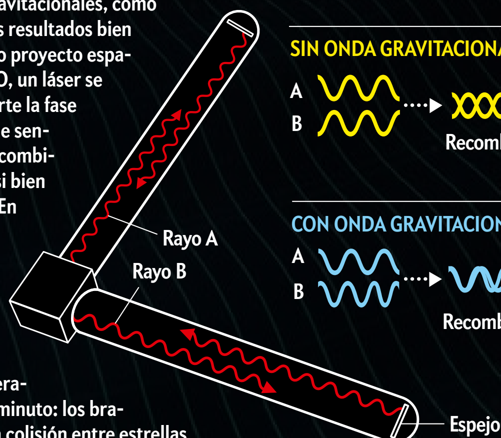


CON ONDA GRAVITACIONAL



Interferometría láser

Los observatorios «tradicionales» de ondas gravitacionales, como LIGO, un experimento terrestre cuyos primeros resultados bien podrían llegar dentro de poco, y LISA, un futuro proyecto espacial, funcionan combinando rayos láser. En LIGO, un láser se divide en dos haces (*A* y *B*), tras lo cual se invierte la fase de uno de ellos. Los haces se envían a lo largo de sendos brazos perpendiculares y, por último, se recombinan (LISA se basa en un principio muy similar, si bien su geometría es la de un triángulo equilátero). En ausencia de ondas gravitacionales, la recombinación de las dos ondas luminosas debería dar lugar a una anulación de la señal (*amarillo*). Ante el paso de una onda gravitacional, sin embargo, la longitud relativa de los brazos se modificaría, por lo que las ondas no se cancelarían por completo y su recombinación generaría un pulso (*azul*). El efecto, no obstante, es diminuto: los brazos de LIGO miden cuatro kilómetros, pero una colisión entre estrellas de neutrones en nuestro vecindario cósmico alteraría su longitud en una distancia menor que el radio de un protón. Los brazos de LISA medirían cinco millones de kilómetros, por lo que permitirían detectar señales aún más débiles.



SIN ONDA GRAVITACIONAL



CON ONDA GRAVITACIONAL



LISA

Este último ha sido siempre uno de los aspectos más criticados de LISA.

Por su parte, los técnicos de LISA argumentan que el supuesto ahorro que implicaría un interferómetro atómico solo se debe a que se trata de una propuesta muy reciente. A menudo, las nuevas técnicas ignoran los tremendos costes de desarrollo y su precio final solo llega a saberse cuando la misión llega a destino, porque, señalan, solo entonces comienzan a apreciarse las verdaderas dificultades de ingeniería que supone integrar todos los sistemas.

EL PROBLEMA DE LA LUZ

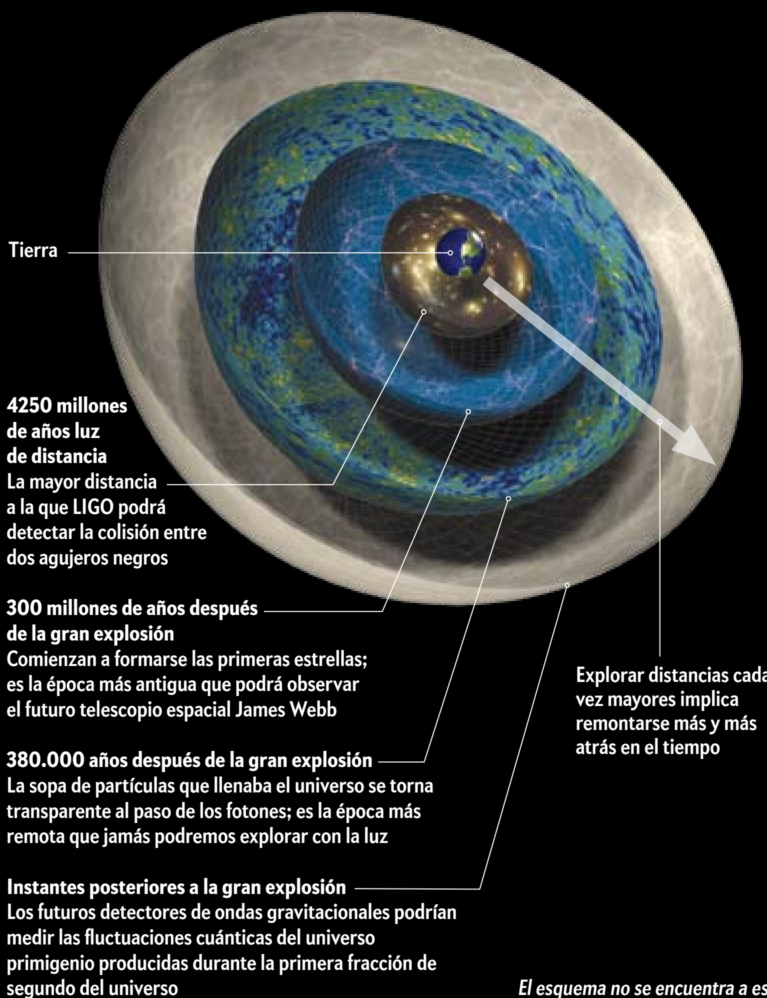
Al preguntar a Saif qué le mueve a dedicar su tiempo libre a una misión incierta que tal vez jamás despegue, responde con su fascinación ante la posibilidad de encontrar nueva física. Saif espera que en las próximas décadas la astronomía viva un cambio de época: que deje atrás la era del fotón para adentrarse en la del gravitón.

Una astronomía basada en las ondas gravitacionales podría superar en numerosos aspectos a las observaciones fundamentadas en la detección de luz. Aparte de la incapacidad de esta última para decirnos algo sobre los primeros instantes del universo, la luz adolece de otras limitaciones como vehículo de información. En primer lugar, los fotones surgen como producto de interacciones entre partículas, por lo que portan información sobre procesos diminutos, como la fusión de hidrógeno en helio que tiene lugar en el corazón de las estrellas. Pero, si deseamos saber cómo se mueven los grandes objetos a través del espaciotiempo, hemos de combinar luz procedente de una infinidad de eventos minúsculos y combinarla para hacer inferencias, como si se tratase de las teselas de un mosaico.

HORIZONTES CÓSMICOS

Más allá del fondo de microondas

Las ondas gravitacionales pueden atravesar fronteras vedadas a la luz. En particular, nos permitirían atisbar más allá del fondo cósmico de microondas (CMB), la luz más antigua que podremos ver jamás, emitida cuando el universo contaba 380.000 años de edad.



Por otro lado, la luz nos proporciona una visión desequilibrada del cosmos, pues suele proceder de entornos que muestran una gran actividad termodinámica. En astronomía, las grandes señales luminosas se originan en fenómenos violentos, como las explosiones de supernova. De esta manera, cuando visualizamos el universo que la luz nos revela, lo hacemos con un sesgo hacia las zonas más calientes y caóticas.

Las señales luminosas son también frágiles. A menudo se diluyen o incluso se desvanecen por completo en su recorrido a través del cosmos. Algunas son absorbidas por las gigantescas nubes de gas que se interponen en su camino. Otras se dispersan o caen para siempre en pozos gravitacionales profundos. Entre estos últimos destacan los agujeros negros supermasivos, los pilares estructurales sobre los que pivotan las galaxias. Los astrónomos intentan conocer mejor lo que sucede con estos objetos; en particular, lo que ocurre cuando dos de ellos chocan y se fusionan. Sin embargo, para ello han de conformarse con la luz que los agujeros negros no devoran; es decir, la que emana de la materia caliente que se arremolina en su periferia. Por fortuna, las ondas gravitacionales no resultan tan delicadas como las luminosas. Apenas se dispersan o se diluyen; en su lugar, se propagan limpiamente por el universo, casi impasibles a los obstáculos que encuentran en su camino.

ECOS PRIMORDIALES

Semanas después de viajar al Centro Goddard visité a David Spergel, director del departamento de astrofísica de la Universidad de Princeton y uno de los cosmólogos más eminentes del mundo. Spergel dirige también el comité de revisión decenal de cosmología y física fundamental del Consejo Nacional de Investigación de EE.UU., cuyos informes determinan en gran parte las prioridades a largo plazo en la investigación en cos-

mología. La NASA presta gran atención a muchas de sus recomendaciones.

En su despacho, Spergel desgrana las virtudes de las ondas gravitacionales. Explica que, al contrario que la luz, el universo siempre ha sido transparente a ellas. No hubo una era primordial en la que las ondas gravitacionales quedasen ocultas a causa de unas condiciones cósmicas extremas. En particular, no tendría que haber ningún obstáculo para que las ondas gravitacionales producidas justo después de la gran explosión llegasen hoy hasta nosotros. Pero ¿cómo sabemos que ya entonces comenzaron a generarse ondas gravitacionales?

«Para producir ondas gravitacionales hay que desplazar enormes cantidades de materia con gran rapidez. Una manera de lograrlo es con una transición de fase», explica Spergel. Tales fenómenos tienen lugar cuando un sistema físico cambia de estado; como, por ejemplo, cuando el agua líquida se congela. Sin embargo, también existen transiciones de fase cósmicas, algunas de las cuales ocurrieron poco después de la gran explosión. Consideremos los quarks, por ejemplo. Hoy en día, estas partículas se hallan confinadas en los núcleos atómicos. Pero, durante los primeros microsegundos después de la gran explosión, revoloteaban con libertad en el seno de lo que los físicos llaman «plasma de quarks y gluones». En cierto momento, el universo experimentó una transición de fase en la que dicho plasma se reorganizó en un nuevo estado: aquel caracterizado por la existencia de protones y neutrones.

«Si en aquel momento tuvo lugar una transición de fase de primer orden como esa, en el plasma se habrían formado burbujas y ello habría agitado violentamente grandes cantidades de materia», señala Spergel. Las transiciones de fase de primer orden ocurren de manera brusca. Aparecen burbujas de la nueva fase en el seno de la antigua, las cuales se expanden y chocan hasta que la antigua fase desaparece y la transición se completa. El caos reinante en tales procesos habría generado ondas gravitacionales muy intensas, las cuales deberían bañar el cosmos aún hoy. Su detección constituiría un primer avistamiento de la más tierna infancia del universo.

Pero podría haber ondas gravitacionales aún más antiguas. Según algunos modelos inflacionarios, las primeras sacudidas de la expansión exponencial del universo fueron acompañadas de fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo, perturbaciones que provocaron que unas regiones del cosmos se expandiesen con mayor rapidez que otras. Dichas fluctuaciones podrían haber generado un patrón particular de ondas gravitacionales, conocido como fondo estocástico, el cual se habría producido cuando la edad del universo no superaba la primera billonésima de cuatrillonésima de segundo [*véase* «Ecos de la Gran Explosión», por Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski; Investigación y Ciencia, marzo de 2001, *y* «Una ventana al primer instante del universo», de Juan García-Bellido y Daniel G. Figueroa; Investigación y Ciencia, diciembre de 2012].

Según Spergel: «La mayoría de los modelos inflacionarios predicen un fondo estocástico de ondas gravitacionales procedente de los momentos más antiguos del universo. Si pudiéramos observarlo, aprenderíamos muchísima física fundamental. Nos mostraría cómo era el universo a escalas de energía 10^{13} veces mayores que las que podemos explorar en el Gran Colisionador de Hadrones».

La búsqueda del fondo estocástico de ondas gravitacionales es ciencia de alto riesgo. Detectarlas se antoja extremadamente difícil, pues requeriría un instrumento de enorme sensibilidad y un análisis de datos laboriosísimo para separar las ondas gravitacionales primordiales de la gran cantidad de ondas generadas por otras fuentes astrofísicas. Pero si se pudieran recolectar dichas señales en todos los rincones del cielo y cribar el ruido estadístico, obtendríamos un nuevo texto fundacional de la cosmología.

«Si lanzamos una de esas naves y no oímos choques de agujeros negros, entonces hay algo muy equivocado en nuestra visión del universo»

Tanto el diseño de LISA como el del interferómetro atómico de Saif han sido concebidos para detectar ondas gravitacionales provenientes de fuentes más prosaicas, como agujeros negros en colisión. En el pasado, los proponentes de LISA esbozaron un posible sucesor, el Observatorio de la Gran Explosión, un proyecto a muy largo plazo diseñado ex profeso para detectar el fondo estocástico de ondas gravitacionales generado durante los primeros instantes de vida del universo. Saif confiesa que, si por él fuera, invertiría el orden de las misiones y comenzaría buscando las ondas gravitacionales de la gran explosión. Pero, por ahora, los diseños en los que trabaja persiguen detectar las mismas señales que LISA. La línea de actuación más conservadora consiste en ceder diplomáticamente ante el grueso de la comunidad astrofísica, muy intrigada por las ondas gravitacionales pero inclinada a comenzar poco a poco, dirigiendo la mirada a objetos y fenómenos cuya existencia se encuentra asegurada.

«Las colisiones de agujeros negros supermasivos son el pan nuestro de cada día en los experimentos de ondas gravitacionales», asegura Spergel. «Si lanzamos una de esas naves y no oímos choques de agujeros negros, entonces hay algo muy equivocado en nuestra visión del universo. Pero el gran objetivo es la cosmología.»

En algún momento, el comité que dirige Spergel podría tener que elegir entre los agujeros negros y la cosmología, y, quizás, entre la interferometría atómica y la de luz. El comité ha de reunirse a mediados de esta década para valorar y ajustar el rumbo fijado en 2010. Para la próxima evaluación de proyectos, el JWST ya debería haberse lanzado, lo que presumiblemente liberará fondos para otras misiones espaciales de calado.

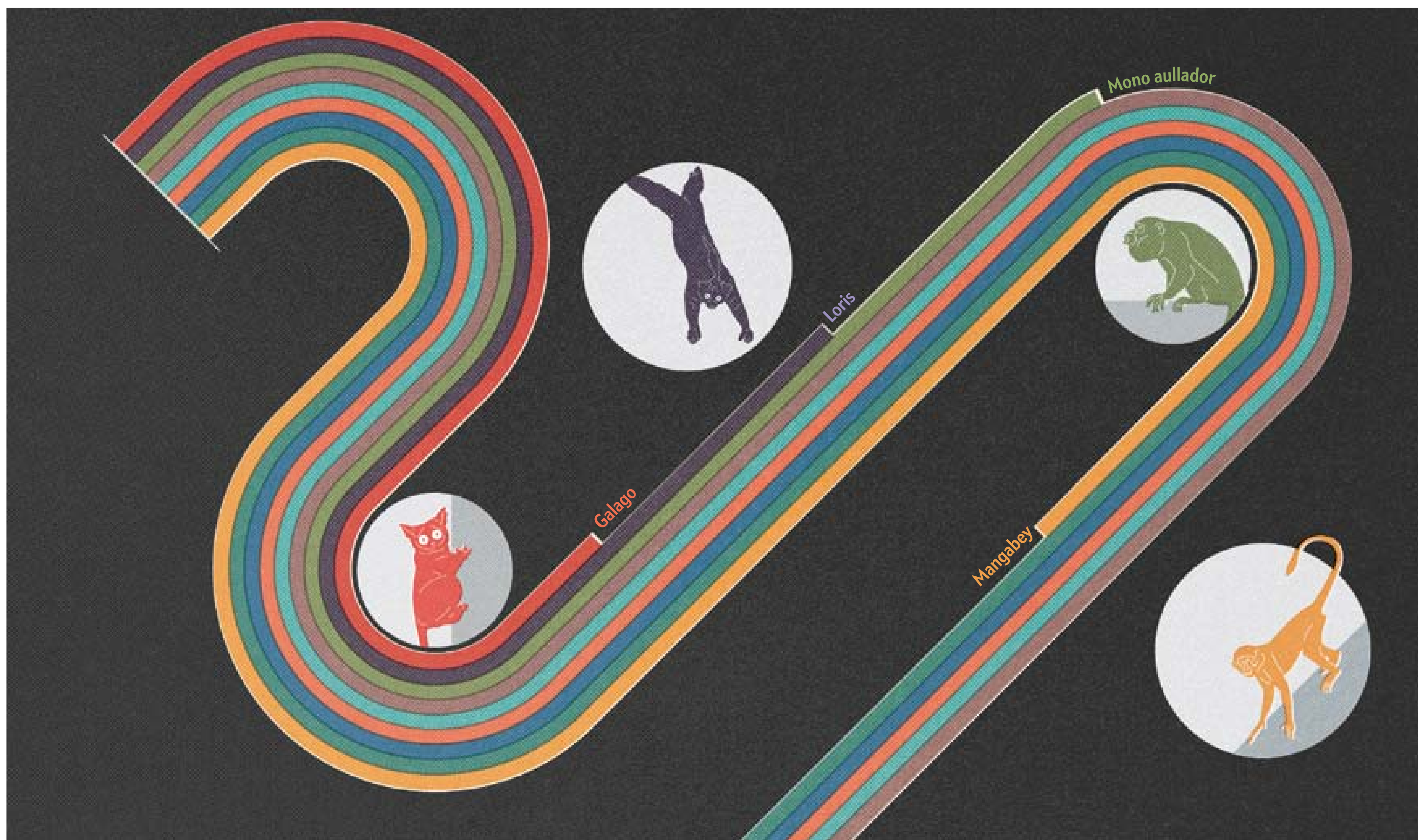
Antes de despedirme, pregunté a Spergel si tenía alguna misión favorita. Respondió que, si bien no estaba convencido de que el interferómetro atómico fuera a imponerse, merecía la pena explorar la idea en serio. «Hace años, en una conversación con Steven Chu mucho antes de que le concediesen el Nobel, hablamos sobre cómo hacer gran ciencia», recuerda. «Me dijo algo que jamás he olvidado: que teníamos que ponernos en la posición de quien puede hacer experimentos importantes. Creo que ambos proyectos pertenecen a esa categoría.»

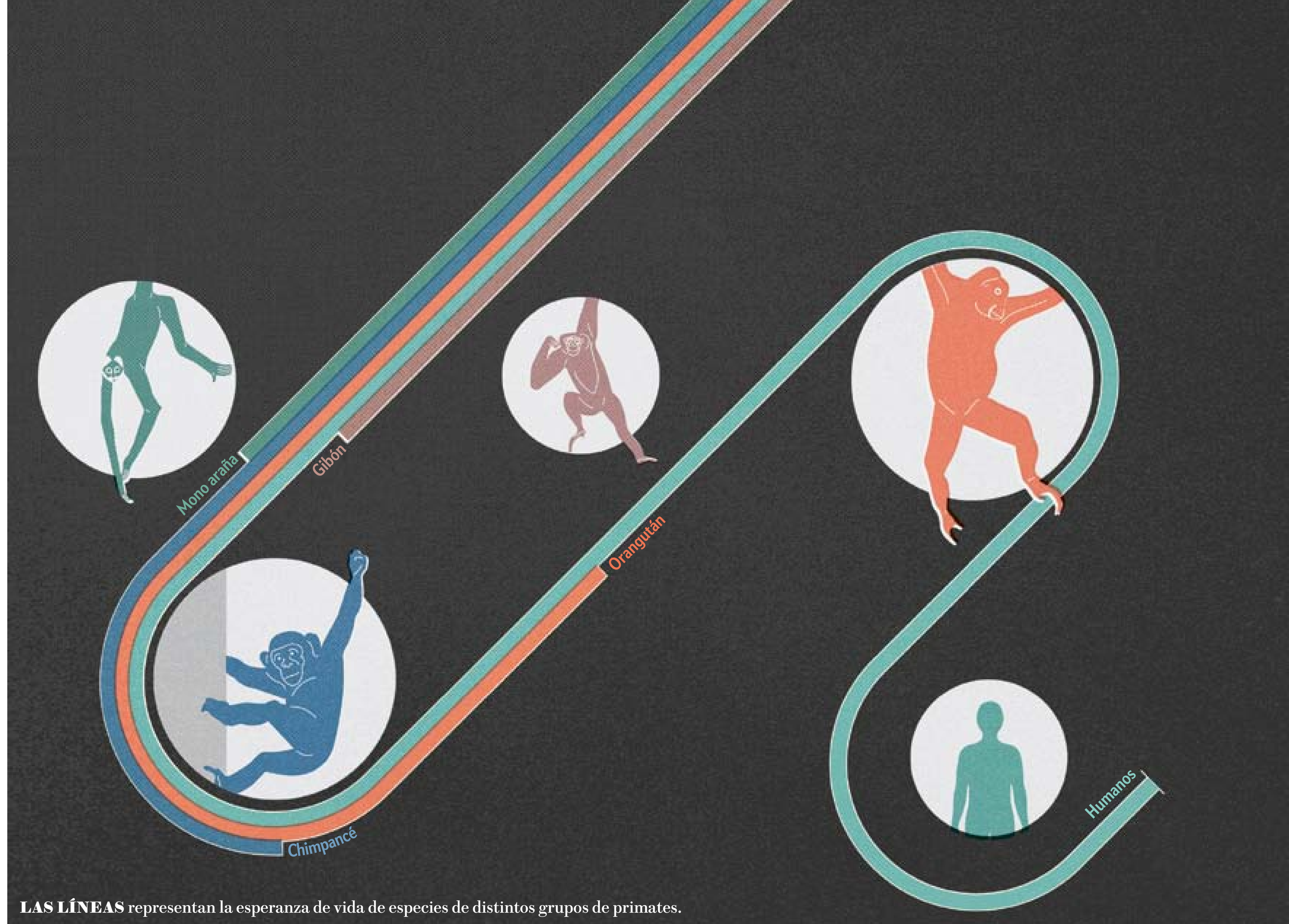
PARA SABER MÁS

La sinfonía inacabada de Einstein. Marcia Bartusiak. Oceáno Ámbar, 2002.
Los sonidos del espaciotiempo. Craig J. Hogan en *Investigación y Ciencia*, marzo de 2007.
Gravitational wave detection with atom interferometry. Savas Dimopoulos et al. en *Physics Letters B*, vol. 678, n.º 1, págs. 37-40; 6 de julio de 2009.
Púlsares y ondas gravitacionales. Michael Kramer y Norbert Wex en *Investigación y Ciencia*, abril de 2013.
Proyecto LISA: **lisa.nasa.gov** (NASA) y **sci.esa.int/lisa** (ESA).

EVOLUCIÓN

La larga vida de los humanos





LAS LÍNEAS representan la esperanza de vida de especies de distintos grupos de primates.

El estudio del genoma y de momias antiguas está ayudando a comprender por qué la esperanza de vida de *Homo sapiens* supera con creces la de otros primates

Heather Pringle

Heather Pringle es divulgadora científica y redactora de *Science*.



Un domingo por la mañana, en un barrio marginal de la ciudad de Lima, se oye llegar un furgón blanco que transporta una docena de cuerpos y se detiene ante el Instituto Nacional de Ciencias Neurológicas. En una pequeña sala de espera, en la parte posterior del edificio, una multitud de científicos y autoridades oficiales bien vestidos observa con atención. Mientras el conductor se apea, un ayudante se apresura a buscar un celador del hospital. Tras pocos minutos, dos hombres conducen el primer cuerpo hacia la unidad de diagnóstico por imágenes del instituto.

Entre los curiosos se halla Caleb Finch, biólogo de la Universidad de California del Sur, que ha estado esperando este momento durante meses. Este científico de 74 años, alto, delgado, canoso y con una larga barba, ha dedicado toda su carrera a estudiar el envejecimiento de los humanos. En comparación con otros primates, nuestra especie es muy longeva. Nuestros parientes más cercanos, los chimpancés, poseen una esperanza de vida al nacer de unos 13 años, valor muy inferior a los 78,5 años que esperan vivir los niños nacidos en Estados Unidos en 2009. Finch ha venido a Lima para investigar el porqué de esta diferencia a partir de pruebas del pasado remoto. Los cadáveres que transporta el furgón corresponden a hombres, mujeres y niños que fallecieron hace 1800 años en una estrecha franja de desierto cercana a la costa, mucho antes de la conquista española. Envueltos en ropas y cubiertos de polvo, estos cuerpos se han momificado de forma natural gracias a la aridez del desierto donde fueron enterrados. Su preservación ofrece nuevas claves para comprender la longevidad humana. Son emisarios de una época anterior a la medicina moderna y permiten el estudio del proceso de envejecimiento en el pasado.

Numerosos investigadores atribuyen nuestra longevidad al descubrimiento de las vacunas, los antibióticos y otros avances de la medicina, al desarrollo de eficaces sistemas de salubridad urbana y a la disponibilidad de verduras, frutas frescas y nutritivas a lo largo de todo el año. De hecho, los datos demográficos indican que estos factores han contribuido a alargar la vida humana en los últimos 200 años. Pero Finch asegura que, aunque han sido factores fundamentales, explican solo una parte del misterio de nuestra longevidad. Después de reunir datos de disciplinas tan diversas como la antropología física, la primatología, la genética y la medicina, ha propuesto una nueva hipótesis polémica: que el aumento progresivo de nuestras vidas empezó mucho antes, cuando nuestros antepasados desarrollaron un sistema de defensa más eficaz para combatir a los numerosos patógenos y agentes agresivos del entorno. Si Finch se halla en lo cierto, las futuras investigaciones sobre las relaciones entre las infecciones, el sistema inmunitario y las enfermedades crónicas de los ancianos pueden cambiar por completo nuestra comprensión del envejecimiento y de cómo afrontar las dificultades que conlleva.

VIVIR MÁS

Las pruebas de que la medicina moderna no es la única responsable de nuestra longevidad proceden de estudios de grupos

EN SÍNTESIS

Los humanos viven durante mucho más tiempo que otros primates, un hecho que tradicionalmente se ha atribuido a la medicina moderna, la disponibilidad de alimentos y los sistemas de higiene.

Pero nuevos estudios señalan que, aunque estos factores han contribuido a aumentar la esperanza de vida en los últimos 200 años, tal tendencia empezó mucho antes.

Cuando nuestros ancestros empezaron a comer más carne, desarrollaron defensas contra los patógenos acompañantes. Estas contribuyeron a aumentar la longevidad, pero también fomentaron la aparición de enfermedades en las etapas finales de la vida.

PÁGINAS ANTERIORES: GAVIN POTENZA





LAS TÉCNICAS de diagnóstico por la imagen empleadas en esta momia de un escriba egipcio llamado Hatiay revelan la presencia de arterias obstruidas. Ello indica que las enfermedades cardiovasculares no solo afectan a las poblaciones actuales, sino que pueden ser el precio que los humanos hemos de pagar por disponer de un sistema inmunitario muy eficaz.

MICHAEL MIYAMOTO. AP PHOTO (*momia*); CORTESÍA DE M. LINDA SUTHERLAND (TAC)

de cazadores-recolectores actuales. En 1985, Nicholas Blurton-Jones, antropólogo biológico de la Universidad de California en Los Ángeles, se adentró con su todoterreno en la selva de la cuenca del lago Eyasi, en Tanzania. Acompañado por su asistente Gudo Mahiya, viajó a los campamentos aislados de los hadza, un pueblo de cazadores-recolectores que viven de una forma parecida a como lo hicieron nuestros antepasados: cazan babuinos y otros animales salvajes, escarban en busca de tubérculos y recolectan miel durante la estación lluviosa en las colmenas de abejas africanas. De un campamento a otro, los dos científicos fueron recogiendo datos demográficos básicos, como el nombre y edad de los integrantes de cada hogar. Durante los siguientes quince años actualizaron el censo en seis ocasiones anotando los nombres de los que fallecían y las causas de la muerte. Además, Blurton-Jones obtuvo datos de un censo anterior de la población hadza realizado por otros dos investigadores.

Los hadza viven de una forma similar a los antiguos humanos o los chimpancés, en un ambiente repleto de patógenos y parásitos. No disponen de agua corriente ni tratamiento de aguas residuales, defecan en una zona situada a entre 20 y 40 metros de su campamento y casi nunca reciben atención médica. A pesar de ello, Blurton-Jones y Mahiya descubrieron que los hadza disfrutan de una vida más larga que la de los chimpancés. De hecho, su esperanza de vida es de 32,7 años. Y, si alcanzan la edad adulta, pueden vivir 40 años más, una longevidad tres veces superior a la de los chimpancés que llegan a la adultez. Algunos ancianos hadza viven hasta los 80 años. Sin duda, la causa de esta larga vida tiene poco que ver con los avances médicos y técnicos.

Los hadza no constituyen un caso aislado. En 2007, dos antropólogos, Michael Gurven, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Hillard Kaplan, de la Universidad de Nuevo México, analizaron los datos demográficos que otros investigadores habían obtenido de cinco pueblos cazadores-recolectores actuales. Las infecciones contribuían al 72 por ciento de los fallecimientos y cada grupo mostraba una curva de mortalidad con forma de J: en la edad infantil superaba el 30 por ciento, disminuía al principio de la edad adulta y ascendía de forma exponencial después de los 40 años. Gurven y Kaplan compararon estas curvas con las de chimpancés salvajes y cautivos que presentan un fuerte repunte de la mortalidad en la adultez, al menos 10 años antes que los cazadores-recolectores humanos. En la publicación que detallaba sus hallazgos, los expertos concluían que los chimpancés parecen envejecer mucho más rápido que los humanos, y mueren antes, incluso en ambientes protegidos.

Pero ¿cuándo empezó a alargarse la vida humana? Para averiguarlo, las antropólogas Rachel Caspari, de la Universidad Central de Michigan, y Sang-Hee Lee, de la Universidad de California en Riverside, examinaron los restos de 768 individuos de cuatro grupos humanos que abarcan millones de años. Utilizaron el grado de desgaste dental, que avanza a un ritmo constante debido a la masticación, para estimar en cada uno de los

cuatro grupos la proporción de adultos jóvenes, de unos 15 años de edad, respecto a los adultos maduros, de unos 30 años (una edad suficiente para poder ser abuelo). Sus estudios revelaron que no se hizo habitual superar los 30 años hasta un pasado reciente de nuestra prehistoria. En los australopitecos, que surgieron en África hace unos 4,4 millones de años, la mayoría de los individuos morían antes de cumplir esa edad. Además, la proporción de los que llegaban a la treintena de edad respecto a los jóvenes de 15 años era tan solo de 0,12. Por el contrario, *Homo sapiens*, que habitó Europa hace entre 44.000 y 10.000 años, solía vivir más allá de los 30, y su coeficiente ascendía a 2,08 [*véase* «El origen de la longevidad», por Rachel Caspari; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

No obstante, calcular la esperanza de vida de poblaciones pretéritas de *Homo sapiens* conlleva dificultades. De la mayoría de nuestro largo pasado no disponemos de datos demográficos detallados, como los que suministran los censos y los registros de defunción. Así, Finch y Eileen Crimmins, gerontóloga de la Universidad de California del Sur, analizaron el primer conjunto estadístico disponible de esta naturaleza, casi completo, con datos recogidos en Suecia en 1751, décadas antes del advenimiento de la medicina moderna y la higiene. El estudio reveló que a mediados de siglo xviii los suecos tenían una esperanza de vida al nacer de 35 años. Pero los que en la infancia sobrevivían a las infecciones bacterianas y enfermedades contagiosas, como la viruela, y llegaban a los 20 años, podían razonablemente esperar vivir otros 40 años más.

Para Finch, este descubrimiento plantea una pregunta importante. Durante el siglo xviii, los suecos vivían codo con codo de forma permanente en pueblos y ciudades grandes. Allí estaban expuestos a graves riesgos de salud, una situación desconocida para los pequeños grupos de chimpancés nómadas. Entonces, ¿por qué los suecos vivían más tiempo? La respuesta puede residir en la incorporación de carne en la dieta de sus remotos antepasados y la aparición de genes que los protegían de los peligros de una alimentación carnívora.

Los suecos del siglo xviii vivían codo con codo en pueblos y grandes ciudades, donde estaban expuestos a graves riesgos de salud, una situación desconocida para los pequeños grupos nómadas de chimpancés. Entonces, ¿por qué los suecos vivían más tiempo?

Genes para una alimentación carnívora

Los chimpancés pasan la mayor parte de sus horas de vigilia alimentándose de higos y otras frutas maduras. Para buscar alimentos ricos en fructosa, deben recorrer grandes territorios y raras veces utilizan el mismo nido dos noches seguidas. Son expertos en la caza de pequeños mamíferos, como los monos colobos rojos, pero no persiguen deliberadamente estas presas. Tampoco consumen grandes cantidades de carne. Los primatólogos que estudian chimpancés salvajes en Tanzania han calculado que la carne representa un 5 por ciento o menos de la dieta anual de estos simios, mientras que en Uganda los estudios demuestran que la grasa animal constituye solo el 2,5 por ciento de su ingesta anual.

Finch opina que, con toda probabilidad, los primeros miembros de la familia humana poseían una dieta semejante, principalmente vegetariana. Sin embargo, en algún momento hace entre 3,4 millones y 2,5 millones de años, nuestros antepasados incorporaron nuevos alimentos con proteínas de origen animal. Algunos yacimientos de Etiopía demuestran que comenzaron a consumir los restos de grandes mamíferos ungulados, como los antílopes. Al utilizar sencillas herramientas de piedra para cortar tiras de carne, romper los huesos para aprovechar la médula rica en grasa, dejaron marcas de corte sobre los fémures y las costillas. Hace 1,8 millones de años, e incluso antes, los humanos empezaron a practicar la caza activa y transportaban cadáveres enteros a sus campamentos. Tal vez el nuevo aporte de calorías y proteínas contribuyó al crecimiento del cerebro, pero también aumentó la exposición a las infecciones. Finch sugiere que este riesgo favoreció la aparición de adaptaciones que permitieron a nuestros antepasados resistir a los ataques de patógenos y, por lo tanto, vivir durante más tiempo.

La mayor exposición a los patógenos a causa del creciente consumo de carne se produjo de varias maneras. Los primeros humanos que aprovechaban los restos de animales muertos, y que comían carne cruda y vísceras, ingerían con mayor probabilidad patógenos infecciosos. Por otra parte, cuando los humanos empezaron a cazar animales de gran tamaño, al enfrentarse a sus presas corrían un mayor riesgo de sufrir heridas y traumatismos, lesiones que pueden dar lugar a infecciones mortales. Incluso cocinar los alimentos, práctica que pudo haber surgido hace un millón de años o más, conlleva peligros. La inhalación del humo de la leña expone diariamente a los humanos a altos niveles de endotoxinas y partículas de hollín. La carne asada o cocinada mejora el sabor y la digestibilidad, pero crea modificaciones químicas y genera los llamados productos finales de la glicación avanzada, que contribuyen a enfermedades graves como la diabetes. Cuando, en época posterior, nuestros antepasados adquirieron la agricultura y la ganadería, hace alrededor de 11.500 años, se sumaron nuevos peligros. La proximidad diaria a los animales domésticos, como cabras, ovejas, cerdos, vacas y pollos, elevaron el riesgo de contraer infecciones bacterianas y víricas de los animales. Por último, cuando las familias se asentaron de forma permanente en los pueblos, las aguas residuales de los humanos y del ganado contaminaban el suministro de agua local. Las bacterias patógenas se propagaban con fuerza.

Aun así, en 1751, la población de Suecia que estaba expuesta a tales riesgos vivía mucho más que sus parientes simios. Para averiguar el motivo de esa longevidad, Finch comenzó a examinar la bibliografía existente sobre el genoma de chimpancés y humanos. Los estudios demostraban que el genoma de ambos coincidía en un 99 por ciento. Pero en el 1 por ciento que es exclusivamente humano, el biólogo evolutivo Hernán Dopazo, del Centro de Investigación Príncipe Felipe en Valencia, y sus colaboradores han identificado un número muy alto de genes

que han experimentado una selección positiva y que cumplen una función clave en nuestra inmunidad (en concreto, en la respuesta inflamatoria). La selección positiva favorece a los genes que aumentan nuestra capacidad de sobrevivir y reproducirnos; ello hace aumentar su frecuencia en las poblaciones a través del tiempo, un proceso que deja una «señal» distintiva en la secuencia de ADN. Los hallazgos de Dopazo han añadido más argumentos a una idea planteada por Finch. Según él, la selección natural, al dotar a los humanos de un sistema perfeccionado para combatir las amenazas microbianas y otros peligros para la salud asociados al mayor consumo de carne, habría extendido a la vez la duración de nuestras vidas.

En su batalla contra las bacterias, virus y otros microorganismos que tratan de invadir los tejidos, nuestro sistema de defensa utiliza dos armas muy eficaces: el sistema inmunitario innato y el adaptativo. El primero se moviliza de inmediato allí donde se produce un ataque o lesión para eliminar patógenos y curar el tejido dañado y, esencialmente, responde de la misma manera a todas las amenazas. En cambio, el sistema adaptativo se pone en marcha con mayor lentitud y ajusta su respuesta a patógenos particulares. Al hacerlo, crea una memoria inmunitaria que confiere protección contra el invasor durante toda la vida.

La inflamación forma parte del sistema inmunitario innato. Se pone a trabajar cuando hay algún daño en los tejidos provocado por microbios, traumatismos, lesiones o toxinas. Como señala Finch, los médicos reconocen sus señas de identidad desde hace tiempo. Hace unos 2000 años, el médico romano Aulo Cornelio Celso describió cuatro síntomas importantes de la inflamación: calor, enrojecimiento, hinchazón y dolor. Finch explica que el calor proviene de las mitocondrias, orgánulos responsables del metabolismo celular, las cuales liberan energía en forma de calor. El aumento de temperatura actúa como una forma de esterilización, ya que muchas bacterias no pueden crecer cuando la temperatura supera los 40 grados Celsius. Por otra parte, la hinchazón se debe a que las células dañadas producen sustancias que empujan a las células sanguíneas a liberar líquidos en los tejidos próximos, con lo que aíslan el área afectada e impiden el contacto con los tejidos sanos.

Finch empezó examinando las modificaciones genéticas humanas relacionadas con la inmunidad. Enseguida le llamaron la atención los cambios en el gen de la apolipoproteína E (*APOE*), molécula que ejerce una gran influencia en el transporte y metabolismo de los lípidos, el desarrollo cerebral y el funcionamiento del sistema inmunitario. El gen posee tres variantes principales (alelos) en los humanos, de las cuales *APOE* e4 y *APOE* e3 son las más frecuentes.

La secuencia genética de *APOE* e4 se parece mucho a la del gen *APOE* de los chimpancés, lo que indica que es la variante humana ancestral que apareció durante el origen del género *Homo*, hace más de dos millones de años, y que pudo haber influido en el aumento de nuestra longevidad. Con algunas diferencias en aminoácidos fundamentales respecto a la secuencia del chimpancé, *APOE* e4 acelera la fase aguda de la inflamación. Aumenta la producción de proteínas como la interleucina-6, que ayuda a elevar la temperatura corporal, y el factor de necrosis tumoral alfa, que induce la fiebre e inhibe la replicación de los virus. Equipados con este sistema mejorado de defensa, los niños de antaño pudieron luchar contra los microbios nocivos que ingerían con los alimentos o se hallaban en su entorno. «Cuando los humanos abandonaron la selva y ocuparon la sabana», destaca Finch, «aumentó su exposición a los agentes infecciosos. La sabana está llena hasta las rodillas del estiércol de los herbívoros y los humanos merodeaban por allí con los pies descalzos».

Por otra parte, los primeros humanos que poseyeron el gen *APOE* e4 también se beneficiaron de otro modo. Esta variante facilita la absorción intestinal de los lípidos y el almacenamiento eficaz de la grasa en los tejidos corporales. En momentos en que había pocas presas y la caza menguaba, los primeros portadores de *APOE* e4 pudieron aprovechar esos depósitos de grasa y elevaron así su probabilidad de supervivencia.

Incluso hoy en día, los niños con el gen *APOE* e4 disfrutan de una ventaja sobre los que no lo presentan. En un estudio con jóvenes de familias pobres de un barrio marginal de Brasil, los portadores de ese alelo sufrieron menos episodios de enfermedades diarreicas causadas por *Escherichia coli* o *Giardia* que los que no lo poseían. También lograron mejores resultados en pruebas cognitivas, quizá como consecuencia de su mayor absorción de colesterol, un requisito dietético para el desarrollo neuronal. Por lo que Finch propone que la adquisición de la variante habría sido adaptativa.

COSTE AÑADIDO

Por todo lo comentado, el gen *APOE* e4 parece ser una pieza clave en el rompecabezas de la longevidad humana. Pero, irónicamente, ahora que vivimos más tiempo, esta variante genética parece traicionarnos cuando nos hacemos viejos. Sus efectos debilitantes se hicieron evidentes cuando nuestros antepasados sobrevivieron más allá de la mediana edad. En Lima, Finch y un equipo internacional de cardiólogos, radiólogos, biólogos y antropólogos están buscando indicios de tales alteraciones en los tejidos cardiovasculares conservados en las antiguas momias de individuos adultos.

En la unidad de diagnóstico por imágenes, atiborrada de gente, Finch observa el ordenador de uno de los técnicos. Ha sido una mañana larga y atareada. Varias de las momias llevadas a la unidad son demasiado voluminosas para introducirlas en el equipo de tomografía axial computarizada (TAC). Otras, al escanearlas, revelan poco más que los restos del esqueleto, lo que plantea dudas sobre si el tejido humano se ha conservado lo suficiente para poder estudiarlo.

Pero nadie se da por vencido. En la pantalla podemos ver una imagen en tres dimensiones de la tomografía que acaba de efectuarse a un fardo traído del furgón. Inclinados sobre ella, los cardiólogos Gregory Thomas, del Centro Médico Memorial Long Beach en California, y Randall C. Thompson, de la facultad de medicina de la Universidad de Misuri en la ciudad de Kansas, examinan una reconstrucción anatómica que les parece extraña, a causa de los siglos de descomposición y desecación. Mientras el técnico desplaza la imagen hacia arriba y abajo, los dos cardiólogos empiezan a identificar los tejidos blandos conservados y la trayectoria serpenteante de las arterias principales. Tras una inspección rápida de las arterias, localizan pequeñas manchas densas y blancas, zonas calcificadas que son síntomas de una etapa avanzada de la aterosclerosis, la principal causa de los ataques cardíacos y de los accidentes cerebrovasculares.

Tradicionalmente, los cardiólogos han considerado la aterosclerosis como una enfermedad de la civilización moderna. Los hábitos actuales, como fumar cigarrillos, realizar poco ejercicio e ingerir abundantes alimentos de alto contenido calórico son causas conocidas del mayor riesgo de esta dolencia. Por otra parte, varios estudios recientes apuntan a una epidemia de aterosclerosis en los países en desarrollo, a medida que estas sociedades adoptan el estilo de vida occidental. Sin embargo, en 2010, Tho-



NAFTALI HILGER, REDUX PICTURES

LOS CAZADORES-RECOLECTORES ACTUALES, como los hadza de Tanzania, habitan en ambientes llenos de parásitos y patógenos, igual que los chimpancés. Sin embargo, viven mucho más tiempo que estos animales, quizá gracias a los genes que permitieron a los humanos comer carne.

mas y sus colaboradores decidieron verificar la idea de que se trata de una enfermedad actual mediante la obtención de TAC de momias humanas antiguas y el examen de sus arterias.

El equipo empezó estudiando 52 momias egipcias de entre 3000 y 2000 años de antigüedad. El antropólogo biológico Muhammad Al-Tohamy Soliman, del Centro de Investigación Nacional de Giza, estimó la edad de cada uno de los individuos a partir del análisis del desarrollo de los dientes y del esqueleto. A continuación, el equipo de médicos estudió minuciosamente los escáneres e identificó tejidos cardiovasculares en casi el 85 por ciento de las momias. Para su sorpresa, el 45 por ciento de ellos presentaba indicios de aterosclerosis, lo que evidenciaba que esta población antigua padecía tal enfermedad. También se sorprendieron al hallar pruebas de aterosclerosis en antiguos egipcios jóvenes. Su media de edad de fallecimiento era de 40 años.

En primavera de 2011, cuando apareció su artículo en la revista *Journal of the American College of Cardiology*, Finch se puso en contacto con este equipo de inmediato y les propuso una nueva explicación sobre los altos niveles de aterosclerosis identificados en su estudio. Los antiguos egipcios, señaló Finch, no eran ajenos a las pestilencias e infecciones. Estudios anteriores habían demostrado que estaban expuestos a una variedad de enfermedades infecciosas, como la malaria, la tuberculosis y la esquistosomiasis (una enfermedad causada por pequeños gusanos parásitos presentes en el agua contaminada). Los portadores del gen *APOE* e4, con su sistema inmunitario mejorado, podían sobrevivir a numerosas infecciones infantiles. Pero durante décadas experimentaron niveles crónicos de inflamación en un entorno rico en patógenos, unos niveles que están relacionados con varias enfermedades mortales de la vejez, como la aterosclerosis y el alzhéimer. En efecto, las placas arteriales características de la aterosclerosis parecen acumularse en la pared vascular durante la inflamación y la cicatrización de heridas. «Y si bien resultaría aventurado equiparar las placas seniles del alzhéimer con las de las arterias, ambas poseen muchos aspectos en común», indica Finch.

Thomas y sus colaboradores pidieron incorporarse al equipo de Finch. Juntos decidieron reunir más datos y examinar los tejidos cardiovasculares de momias antiguas de una amplia gama de culturas. Los egipcios utilizados en su primer estudio seguramente procedían de clases altas que podían permitirse el lujo de la momificación; tales individuos quizá practicaban menos ejercicio y consumían más alimentos ricos en calorías. Por este motivo, el equipo amplió el estudio a otras culturas diferentes. Examinaron las tomografías que se habían tomado de momias de los indios pueblo de Utah y de unangas de Alaska de más de un siglo de antigüedad. Además, analizaron los TAC que se habían realizado en momias prehispánicas de la costa de Perú, anteriores al año 1500 a.C.

El equipo publicó sus hallazgos en la revista *Lancet* el pasado marzo. De las 137 momias estudiadas, el 34 por ciento presentaba indicios leves o claros de aterosclerosis. Los escáneres revelaban esta enfermedad en las cuatro poblaciones, incluido el pueblo de cazadores-recolectores unangas, que consumían sobre todo alimentos de origen marino. Sus resultados refutaban la idea de que la aterosclerosis era una enfermedad moderna y señalaba otra explicación. Según ellos, los altos niveles de infecciones e inflamaciones crónicas en esa época habrían originado los aspectos inflamatorios de la aterosclerosis.

Finch apunta que tal vez la antigua variante genética que mejoró nuestra respuesta inflamatoria y las posibilidades de alcanzar la edad reproductiva (*APOE* e4) conllevó a la larga un coste añadido: ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares, alzhéimer y otras dolencias crónicas de la vejez. De hecho, *APOE* e4 contribuiría a un fenómeno que los biólogos llaman pleiotropía antagónica. Un gen con un fuerte efecto positivo en los jóvenes y un impacto adverso sobre los ancianos.

Los resultados ponen en entredicho la idea de que la aterosclerosis sea una enfermedad moderna y apuntan a otra explicación

INMUNIDAD PERFECCIONADA

La investigación también apunta a otras variantes de genes responsables de nuestra longevidad. Más o menos al mismo tiempo que *Homo sapiens* se originó en África, hace unos 200.000 años, apareció una segunda variante del gen *APOE*. Este alelo, conocido como *APOE* e3, mejoró la salud de los adultos en el rango de edad entre los 40 y los 70 años y ayudó a retrasar el envejecimiento. En la actualidad tiene una prevalencia de entre el 60 y el 90 por ciento en las poblaciones humanas. Los portadores de *APOE* e3 exhiben una respuesta inflamatoria menos intensa que aquellos con la variante ancestral. Además, parecen mejor adaptados a dietas ricas en carne y grasa. Tienden a presentar menos colesterol en sangre y a padecer menos dolencias asociadas a la edad, como la cardiopatía isquémica, el deterioro cognitivo y el alzhéimer. De hecho, los portadores de esta variante más reciente disfrutan de una esperanza de vida hasta seis años mayor que sus congéneres con *APOE* e4. Finch opina que *APOE* e3 tal vez fue un factor que contribuyó a aumentar la esperanza de vida.

Pero el gen *APOE* no es el único que se ha relacionado con la evolución de la longevidad humana. En la Universidad de California en San Diego, el profesor de medicina Ajit Varki y sus colaboradores están investigando otros genes cuya modificación habría mejorado nuestra supervivencia. La investigación de Varki se centra en los genes *SIGLEC*, que desempeñan una función clave en el sistema de defensa. Estos genes expresan proteínas que se sitúan en la membrana celular y actúan como centinelas, o receptores. Su función «es reconocer amigos, no enemigos», explica Varki, una tarea que no resulta fácil. Para engañar a los centinelas, los patógenos infecciosos desarrollan sistemas de camuflaje a base de proteínas que los hacen parecer «amigos».

En 2012, Varki y su equipo publicaron un estudio en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, en el que describían dos cambios clave en estos genes, sucedidos hace entre 100.000 y 200.000 años, que perfeccionaron nuestra capacidad para combatir los patógenos. Uno de ellos dio lugar a una nueva variante humana, que no era funcional, derivada del gen ancestral de los primates *SIGLEC 17*. Un segundo evento suprimió por completo el antiguo gen *SIGLEC 13*. Para entender mejor estos cambios, los investigadores recrearon experimentalmente las proteínas que expresaban los genes *SIGLEC 13* y *SIGLEC 17*. Descubrieron que tales receptores habían sido «engañados» por patógenos responsables de dos infecciones mortales en los bebés: estreptococos del grupo B y *Escherichia coli* K1. De esta forma, como la selección natural eliminó a los genes imperfectos de nuestro genoma, las probabilidades de supervivencia aumentaron en los niños.

Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que el refinamiento de nuestras defensas habría cumplido una función importante en el alargamiento de la vida humana. «Nuestro sistema inmunitario experimentó numerosos cambios», apunta Varki. Y mientras los genetistas y biólogos siguen indagando en la parte del genoma que nos distingue como humanos, muchos se centran en buscar otras variantes y eventos genéticos que contribuyeron a nuestra longevidad actual.

Pero algunos de estos resultados están llevando a varios investigadores a reflexionar. Los mensajes de salud pública han advertido desde hace tiempo que ciertos estilos de vida, como la inactividad física o las dietas ricas en calorías, son en gran parte culpables de la alta incidencia de la aterosclerosis, ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares. Pero los nuevos estudios, sobre todo los realizados en momias antiguas, ofrecen una visión más compleja. Nuestro ADN y un sistema inmunitario perfeccionado podrían contribuir al desarrollo de tales enfermedades. «Tal vez tenemos menos capacidad de detener la aterosclerosis de lo que pensábamos», reflexiona el cardiólogo Thompson. «Quizá debamos cambiar nuestro esquema mental.» Y acaso los investigadores deberían buscar otros factores de riesgo que no conocemos.

Los nuevos hallazgos también han planteado una pregunta fundamental acerca de la longevidad humana. ¿Podemos esperar que nuestra vida continúe alargándose? Algunos científicos han predicho que los bebés nacidos después de 2000 en los países donde la esperanza de vida ya era alta, como en EE.UU., Canadá, Reino Unido y Japón, vivirán 100 años. Sin embargo, Finch se muestra algo escéptico. Según él, la tendencia hacia la obesidad en muchas poblaciones y el deterioro ambiental provocado por el cambio climático podría afectarnos y reducir nuestra longevidad, lo que supondría algo doloroso después de los logros alcanzados. «Creo que hay razones para ser cautos», concluye Finch. «Pero el tiempo lo dirá.»

PARA SABER MÁS

Evolution of the human lifespan and diseases of aging: Roles of infection, inflammation, and nutrition. Caleb E. Finch en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, suplemento n.º 1, págs. 1718-1724, 26 de enero de 2010.
La ciencia de la longevidad. *Temas de Investigación y Ciencia* n.º 69, julio/septiembre de 2012.
Atherosclerosis across 4000 years of human history: The horus study of four ancient populations. Randall C. Thompson et al. en *Lancet*, vol. 381, n.º 9873, págs. 1211-1222, abril de 2013.

Rafael R. Daga es profesor de genética molecular en la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla e investigador del Centro Andaluz de Biología del Desarrollo (CABD), donde dirige su grupo de investigación en arquitectura nuclear y morfogénesis.

Silvia Salas-Pino es profesora de genética en la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

Paola Gallardo es licenciada en biotecnología y trabaja como investigadora en el CABD.



GENÉTICA

La función reguladora del genoma

El proyecto internacional ENCODE ha revelado que la mayor parte de nuestro ADN, antes denominado «basura», se encarga de organizar y regular los genes que codifican proteínas

Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo

En el año 2001 finalizó el Proyecto Genoma Humano y se conoció la secuencia de nuestro ADN, esto es, la lista de «letras» que conforman los cromosomas de nuestras células. Pero la gran expectación inicial se desvaneció cuando se descubrió que, a pesar de haber descifrado el libro de instrucciones que sustenta la vida humana, solo se sabía interpretar una pequeña parte de él, alrededor del 1,5 por ciento. Ese porcentaje correspondía, en su mayoría, a genes que codificaban proteínas con una función concreta (estructural, enzimática, hormonal o inmunitaria) en nuestro organismo. El resto del genoma no parecía ejercer ninguna función relevante, por lo que se le denominó ADN «basura».

EN SÍNTESIS

Tras finalizar la secuenciación del genoma humano en 2001 se puso de manifiesto que una gran parte de él no parecía ejercer ninguna función relevante, por lo que se le denominó ADN «basura».

Durante más de diez años, el proyecto internacional ENCODE se ha esforzado en desentrañar el significado de esa enorme proporción del genoma.

Los hallazgos han revelado la enorme complejidad de organización del genoma. En él se han identificado numerosos elementos reguladores responsables de la activación o represión de los genes. Los resultados del proyecto tendrán una importante repercusión en el diagnóstico y tratamiento de múltiples enfermedades humanas.

THINKSTOCK



MÁS ALLÁ DE LA CONFIGURACIÓN en doble hélice del ADN, nuestro genoma presenta una intricada red de interconexiones entre sus distintas regiones.

Aparte de la incógnita que planteaba la enorme proporción de ADN sin valor aparente, varias preguntas quedaban todavía abiertas. ¿Cómo se utilizaba y controlaba la información contenida en nuestro genoma? ¿Cómo se disponían y regulaban los genes? ¿Cómo la ingente cantidad de códigos daba lugar a un organismo vivo? Asimismo, resultaba de especial interés averiguar la forma de utilizar toda esa información para llegar a diagnosticar y curar ciertas enfermedades humanas. Los esfuerzos para dar significado a la secuencia de los más de 3000 millones de nucleótidos (formados por las bases adenina, citosina, guanina y timina, o A, C, G, T) que componen el genoma humano no habían hecho más que empezar.

Con el objetivo de paliar este vacío en el conocimiento, hace diez años se emprendió un proyecto piloto a escala internacional, financiado y promovido por el Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano de Estados Unidos (NHGRI, por sus siglas en inglés). Bautizado como *Encyclopedia of DNA Elements* (ENCODE), el proyecto trataba de descifrar ese 98,5 por ciento del genoma, cuya función se desconocía. La iniciativa fue desarrollada por un consorcio compuesto por 442 investigadores, pertenecientes a 32 instituciones de países como EE.UU., Reino Unido, Singapur, Japón, Suiza y España, entre otros. En nuestro país, cabe destacar la participación del Centro de Regulación Genómica, en Barcelona, que ha liderado el grupo de análisis de ARN. También han participado algunos investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas y se ha contado con el apoyo del Instituto Nacional de Bioinformática. El proyecto finalizó en septiembre de 2012, y como resultado se publicaron 30 artículos científicos, seis de ellos en la revista *Nature* y el resto en *Genome Research* y *Genome Biology*.

Mediante el estudio de 147 tipos celulares y el empleo de una combinación de análisis informáticos, anotación manual y validación experimental, el proyecto ENCODE ha revelado que gran parte del genoma humano contiene elementos funcionales. Entre ellos se incluyen las regiones responsables de codificar proteínas (los genes propiamente dichos) y las que regulan la expresión de los genes. De hecho, el proyecto concluyó que una enorme proporción del ADN, el que no contiene genes y que había sido considerado «basura», correspondía a elementos reguladores.

Los resultados pusieron también de manifiesto que numerosas alteraciones en la secuencia de ADN asociadas a enfermedades humanas no se producen en los genes sino en las regiones reguladoras, lo que cambia la visión tradicional sobre el origen de la disfunción celular responsable de ciertos trastornos.

Todos los datos generados en el proyecto son de libre acceso y representan una valiosa fuente de información para la comunidad científica, lo que ha contribuido enormemente al conocimiento que se tiene sobre el genoma humano.

UNA NUEVA VISIÓN

La regulación génica determina cuándo, cuánto y dónde (en qué tejido) se expresa un gen concreto. Se trata de un proceso mucho más complejo de lo que nadie se había planteado; tanto, que cuando finalizó la segunda fase del proyecto se anunció que los datos obtenidos harían modificar varios de los conceptos recogidos en los libros de texto actuales.

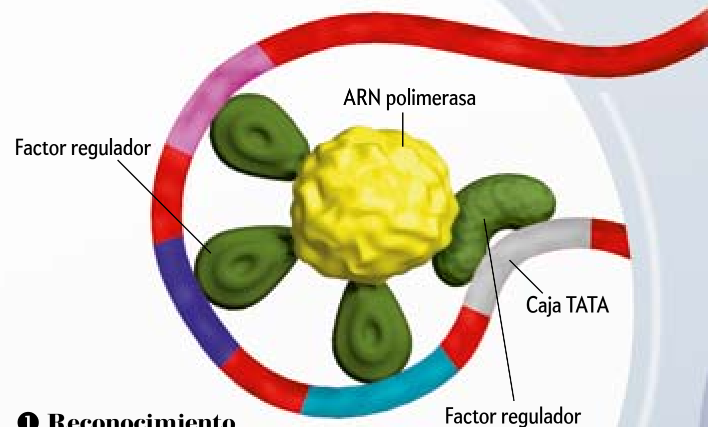
Los resultados de ENCODE han demostrado que la expresión de los genes está influenciada no solo por secuencias de ADN reguladoras cercanas a estos, sino por otras regiones muy distantes.

Además, se ha demostrado que una parte de la regulación de los genes está controlada también por moléculas de ARN

MECANISMOS DE REGULACIÓN

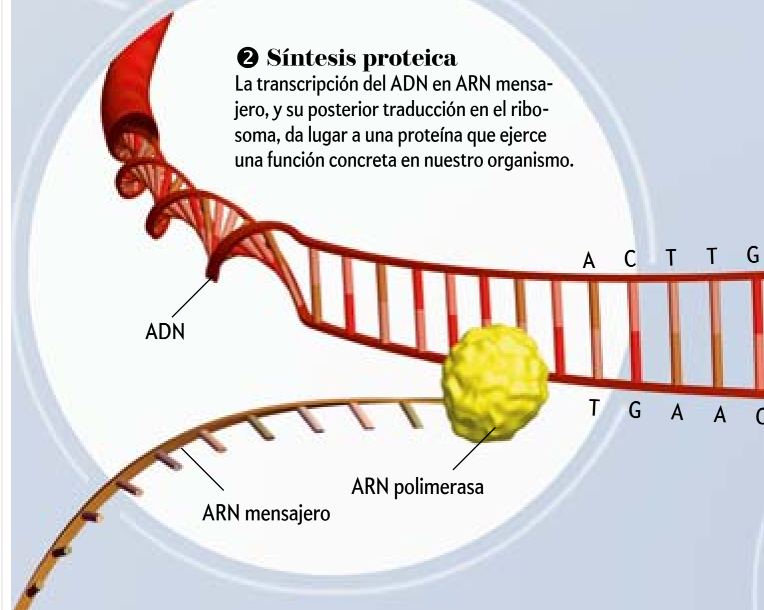
¿Cómo se controla la activación de los genes?

Aparte de codificar las proteínas esenciales para el funcionamiento de nuestras células, una gran proporción del genoma humano se encarga de regular si un gen responsable de una proteína se activará o no. El proyecto ENCODE ha profundizado en el estudio de los mecanismos de regulación que se detallan en la ilustración.

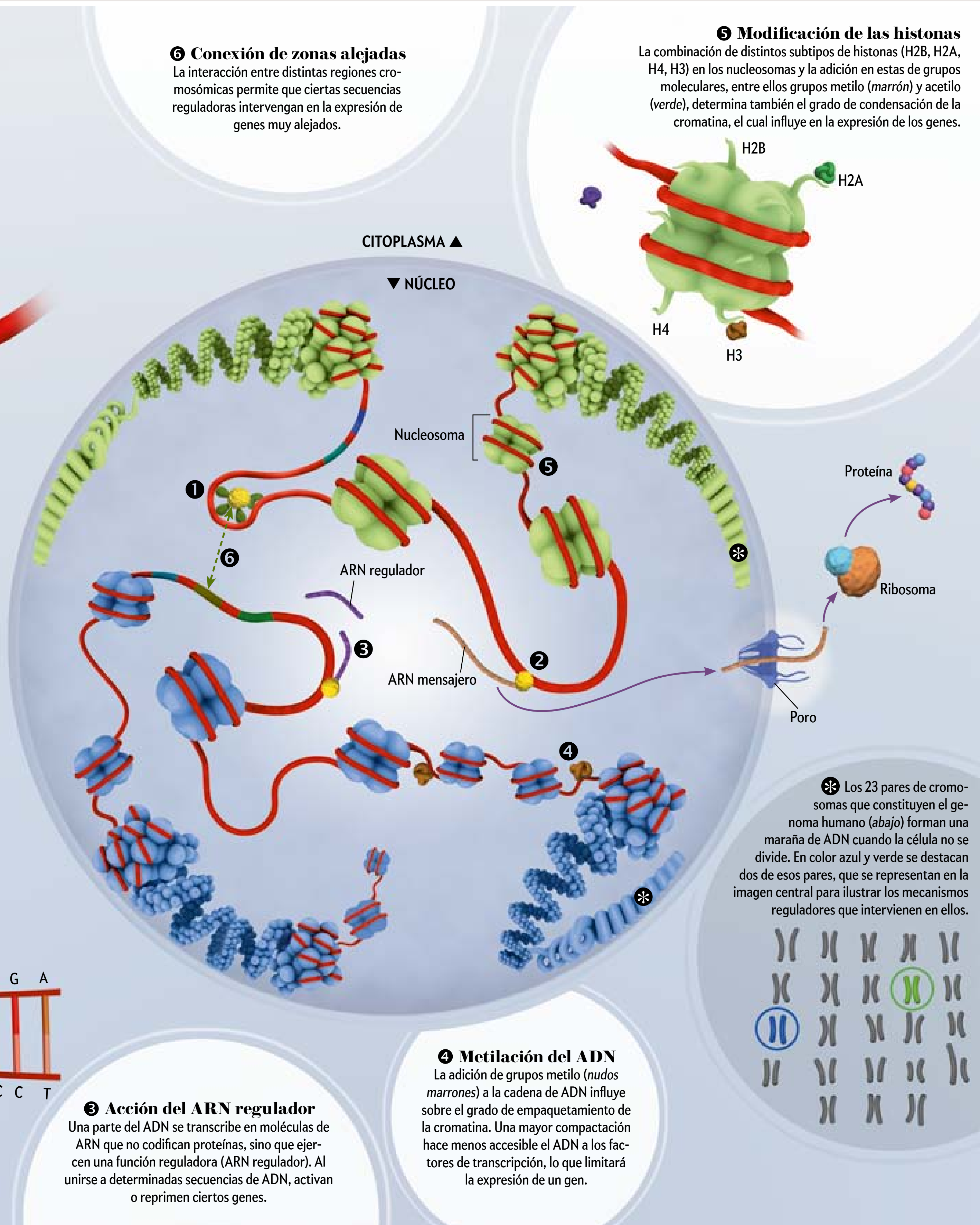


❶ Reconocimiento de las secuencias reguladoras
La maquinaria transcripcional reconoce las secuencias reguladoras de ADN (*barras de distintos colores sobre la fibra de ADN, en rojo*). En el reconocimiento participa la ARN polimerasa, enzima que se asocia a diferentes factores reguladores (*verde oscuro*). Este complejo se une por un lado al promotor (caja TATA, *blanco*) y por otro, a otras secuencias (por ejemplo, potenciadores) aguas arriba del promotor.

❷ Síntesis proteica
La transcripción del ADN en ARN mensajero, y su posterior traducción en el ribosoma, da lugar a una proteína que ejerce una función concreta en nuestro organismo.



VÍCTOR M. CARRANCO FABRE, VCREA (*ilustraciones*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* (*infografía*)



❻ Conexión de zonas alejadas
La interacción entre distintas regiones cromosómicas permite que ciertas secuencias reguladoras intervengan en la expresión de genes muy alejados.
❺ Modificación de las histonas
La combinación de distintos subtipos de histonas (H2B, H2A, H4, H3) en los nucleosomas y la adición en estas de grupos moleculares, entre ellos grupos metilo (marrón) y acetilo (verde), determina también el grado de condensación de la cromatina, el cual influye en la expresión de los genes.
H2B
H2A
H4
H3
CITOPLASMA ▲
▼ NÚCLEO
Nucleosoma
Proteína
Ribosoma
ARN regulador
ARN mensajero
Poro
G A
C T
❋ Los 23 pares de cromosomas que constituyen el genoma humano (abajo) forman una maraña de ADN cuando la célula no se divide. En color azul y verde se destacan dos de esos pares, que se representan en la imagen central para ilustrar los mecanismos reguladores que intervienen en ellos.
❸ Acción del ARN regulador
Una parte del ADN se transcribe en moléculas de ARN que no codifican proteínas, sino que ejercen una función reguladora (ARN regulador). Al unirse a determinadas secuencias de ADN, activan o reprimen ciertos genes.
❹ Metilación del ADN
La adición de grupos metilo (nudos marrones) a la cadena de ADN influye sobre el grado de empaquetamiento de la cromatina. Una mayor compactación hace menos accesible el ADN a los factores de transcripción, lo que limitará la expresión de un gen.

especiales, que no codifican proteínas, y por modificaciones epigenéticas. Estas últimas consisten en cambios químicos en la secuencia de ADN o en las proteínas asociadas a él (las histonas), que repercuten en el grado de empaquetamiento del ADN y, por tanto, en la accesibilidad que tienen a él las moléculas que regulan la activación de los genes. Cuando un fragmento del ADN se halla empaquetado, no se pueden leer sus genes; por consiguiente, el grado de compactación del ADN representa un importante mecanismo de regulación de la expresión génica [*véase* «Evolución de la cromatina», por G. A. Babbitt; Investigación y Ciencia, mayo de 2011].

Estos resultados han supuesto un cambio en la percepción de la regulación génica como un proceso lineal. Se ha demostrado que no solo importa el contexto genómico de un gen, sino también la disposición tridimensional del ADN y la localización de ese gen en una región (o territorio) concreta del núcleo celular. Detallamos a continuación los datos más relevantes que ha obtenido el proyecto ENCODE sobre los elementos funcionales del genoma.

UN ABANICO DE ARN

El 62 por ciento de la secuencia del genoma humano da lugar a transcritos. Estos corresponden a moléculas de ARN de dos tipos principales: los que originan una proteína (transcritos codificantes) y los que no (transcritos no codificantes). En el primer caso, la secuencia de ADN se transcribe en una cadena de ARN mensajero (ARNm), que posteriormente será «traducida» por la maquinaria celular en una proteína, como la insulina o la hemoglobina. El genoma humano contiene 20.687 secuencias codificantes, que representan el 2,9 por ciento del total de la información contenida en el genoma.

En el segundo caso, a partir del ADN se formará ARN como producto final, pero este no dará lugar a una proteína, sino que funcionará como elemento regulador de la expresión de otros genes, en unos casos inhibiéndolos y en otros activándolos, según el tipo de ARN del que se trate. Entre las distintas clases de ARN destacan los largos no codificantes (ARNlnc, *long non-coding*) y los pequeños (ARNs, *small*), que cuentan con 9640 y 8801 tipos, respectivamente. Existen varias subclases de ARN pequeños, como el de transferencia (ARNt), el micro ARN (ARNmi), el ARN pequeño nuclear (ARNsn, *small nuclear*) y el ARN pequeño nucleolar (ARNsno, *small nucleolar*), que se clasifican según su localización celular y su lugar de actuación. Por ejemplo, los micro ARN actúan reduciendo los niveles de expresión de otros genes mediante su unión a moléculas de ARN mensajero parcialmente complementarias.

En los últimos años se ha descubierto la importancia de los ARN no codificantes para el funcionamiento y regulación génica. Estos actúan a lo largo de casi todo el genoma, aunque la mayoría se sitúan cerca de los genes o en intrones (secuencias que forman parte de un gen pero que son eliminadas una vez que este se transcribe en ARN mensajero). La variedad y cantidad de ARN en las células constituyen un indicio de la relevancia de estas moléculas.

Para elaborar un catálogo de todos los tipos de ARN que existen, el proyecto ENCODE se sirvió de distintos tipos celulares, ya que cada subconjunto de ARN reguladores y codificantes confiere identidad morfológica y funcional a cada tipo de célula.

REGIONES REGULADORAS

A pesar de que todas las células de nuestro organismo poseen el mismo libro de instrucciones, esto es, la misma información genética, nuestro cuerpo posee múltiples tipos celulares que conforman los distintos tejidos y órganos. Mientras que todas las células usan una parte común del genoma, algo necesario para llevar a cabo las funciones básicas y ordinarias (como producir energía, recambiar los componentes esenciales, etcétera), cada tipo celular emplea además una parte específica para llevar a cabo tareas concretas dentro del organismo. De este modo, en las neuronas se activan una serie de genes que permanecen inhibidos en las células musculares y que determinan su morfología y funciones particulares, y viceversa. La parte del genoma que un tipo celular no utiliza se reprime y, por consiguiente, dejan de sintetizarse ciertas proteínas. Lo que distingue a unas células de otras es la expresión diferencial de determinados genes y ARN reguladores.

Algunos genes presentan una expresión diferencial en el tiempo, ya que codifican proteínas solo en determinados momentos de la vida de un individuo. Ello reviste especial importancia durante el desarrollo embrionario: existen genes que se activan en cortos períodos de tiempo, cuando se está formando el organismo, y luego son reprimidos para siempre.

La expresión diferencial que da lugar a cada tipo celular es posible gracias a la existencia en el genoma de numerosas regiones reguladoras y de factores que interaccionan con ellas.

Los factores corresponden a proteínas con función reguladora y pueden ser de varios tipos: de transcripción, modificadores de la cromatina o los que intervienen en la unión de otros factores con la doble hélice de ADN, entre otros. Los más conocidos son los factores de transcripción, que se unen a determinadas secuencias de ADN y regulan la transcripción de este en ARN. Entre los distintos factores de transcripción, unos son necesarios para la síntesis de proteínas, que permiten a las células desempeñar sus funciones vitales; otros controlan la expresión de proteínas o transcritos no codificantes (con función reguladora) específicos de cada tipo celular; y otros se activan como respuesta a determinadas situaciones, como la existencia de un patógeno o la ausencia o presencia de un nutriente o una condición de estrés.

Las regiones reguladoras del genoma, o interruptores génicos, corresponden a secuencias de ADN cortas, que operan a modo de códigos de barras, a las que se unen los factores de regulación específicos. En muchos casos, tales regiones se ubican cerca del gen cuya expresión regulan e incluyen elementos funcionales muy diversos: cabe destacar los promotores, que promueven la transcripción que producirá un ARN; los potenciadores, que aumentan la cantidad de ARN que se produce a partir de un gen; los silenciadores, con un efecto contrario a los potenciadores; y los aislantes, que aíslan los elementos reguladores de ciertos genes o grupos de genes de otros vecinos.

El proyecto ENCODE ha realizado un amplio estudio de los elementos reguladores mediante múltiples aproximaciones experimentales. Uno de sus objetivos ha consistido en identificar las regiones del ADN donde se unen proteínas reguladoras, la mayoría de las cuales corresponde a factores de transcripción, como ya se ha comentado. Para ello se seleccionaron 119 proteínas de unión al ADN (las más representativas, entre ellas 87 factores de transcripción y varios componentes de la ARN polimerasa, la enzima encargada de copiar el ADN en ARN). Este análisis se realizó en 72 tipos celulares y se emplearon diversas técnicas de análisis biológico, como la inmunoprecipitación de cromatina seguida de secuenciación (*ChIP-sequencing*). La técnica consiste en inmovilizar los factores unidos al ADN mediante

Con el objetivo de describir todos los elementos funcionales de nuestro genoma, el Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano de Estados Unidos lanzó en 2003 el proyecto ENCODE. Pretendía paliar el vacío en el conocimiento acerca del 98,5 por ciento de nuestro ADN, cuya función no se sabía interpretar después de haber finalizado su secuenciación en 2001.

La magnitud del proyecto, que finalizó en 2012, se refleja en los siguientes datos:



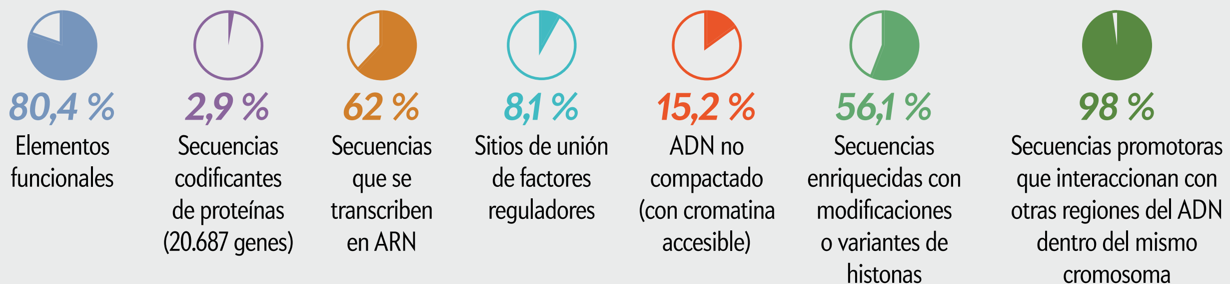
investigadores participantes, procedentes de **32** instituciones de EE. UU., Reino Unido, Singapur, Japón, Suiza y España, entre otros países

tipos celulares estudiados

millones de dólares de financiación

conjuntos de datos generados

Los resultados han generado 30 artículos científicos que arrojan luz sobre la función del genoma no codificante. Vemos ahora que las secuencias que antes se consideraban irrelevantes desempeñan un importante papel regulador. Las conclusiones principales del estudio sobre los elementos funcionales del ADN y su proporción en el genoma se resumen aquí:



un tratamiento químico; estos se purifican y, a continuación, se secuencian e identifican los fragmentos de ADN a los que estaban unidos. El análisis permitió establecer que, en promedio, el 8,1 por ciento del genoma corresponde a puntos de unión con proteínas reguladoras. La gran mayoría de los fragmentos de ADN donde se fijan los factores reguladores presentan motivos o secuencias de unión específicas para cada factor, que adquieren una estructura y propiedades que favorecen la interacción con unos reguladores pero no con otros.

ACCESIBILIDAD DE LA CROMATINA

El ADN se encuentra enrollado sobre unas proteínas (histonas) y el conjunto forma los nucleosomas, la estructura básica de la cromatina [*véase* «El papel clave de las histonas», por R. González Romero et al.; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011]. A su vez, la cromatina puede hallarse más o menos compactada, lo que determina la accesibilidad de factores implicados en la regulación de la expresión génica. Una mayor compactación puede limitar el acceso de los factores responsables de transcribir el ADN en ARN y, por consiguiente, dificultar la activación de un gen.

Las zonas donde el ADN se asocia a las histonas pueden identificarse mediante la técnica de hipersensibilidad de la cromatina a la DNAsa I (DHS). La DNAsa I es una endonucleasa, una enzima capaz de cortar regiones de ADN desnudas. Las regiones del ADN unidas a las histonas resultan inaccesibles a la enzima, por lo que quedan intactas tras la digestión. Mediante esta técnica, el proyecto ENCODE ha determinado que el 15,2 por ciento del genoma consiste en regiones de cromatina accesibles (ADN no compactado) y que el 94,4 por ciento de los factores reguladores unidos a sus correspondientes regiones reguladoras se hallan dentro de estas regiones no compactadas.

Este análisis ha constituido otra de las herramientas experimentales para identificar las regiones del ADN con función reguladora. Gracias a él, se ha creado una colección de motivos reguladores. En 41 tipos de células humanas se han descrito más de 8,4 millones de secuencias reguladoras (unos 200.000 por tipo celular) y 45 millones de sitios de unión de proteínas reguladoras. La identificación de tales elementos reviste una importancia especial, puesto que el origen de numerosas enfermedades humanas podría hallarse en estas pequeñas secuencias.

EL CÓDIGO EPIGENÉTICO

Las histonas que contribuyen al empaquetamiento del ADN pueden ser modificadas químicamente mediante múltiples mecanismos, entre ellos la metilación y la acetilación (adición de un grupo metilo o acetilo, respectivamente). Asimismo, existen distintas variantes de histonas (subtipos de histonas con una secuencia y estructura proteica similares). Tanto las modificaciones de las histonas como la existencia de diferentes variantes aumentan o disminuyen la afinidad de estas proteínas con el ADN, lo que confiere a la cromatina distintas propiedades de accesibilidad y regulación.

Una de las metas del proyecto ENCODE ha consistido en determinar las modificaciones que presentan las histonas a lo largo de todo el genoma. En este caso se empleó también la técnica de inmunoprecipitación de cromatina seguida de secuenciación para detectar de forma precisa a qué regiones del genoma se hallaban unidas varias formas modificadas de

histonas. En total, se estudiaron 12 variantes de histonas en 46 tipos celulares humanos y se determinó que el 56 por ciento del genoma se halla altamente enriquecido en estas. Es decir, las variantes de histonas y sus modificaciones químicas no se distribuyen de forma homogénea, sino que tienden a acumularse en zonas concretas del genoma. De este modo, las histonas metiladas suelen concentrarse en las regiones promotoras de genes reprimidos, mientras que las acetiladas se sitúan con preferencia en torno a genes activos.

Por otro lado, el análisis reveló que los estados modificados de las histonas, así como la actividad transcripcional de las regiones asociadas a ciertas variantes de histonas, varía enormemente de un tipo celular a otro; es decir, el hecho de que una célula se diferencie en un tipo u otro dependerá en parte de la composición en sus diferentes variantes de histonas y de la modificación química que experimenten estas.

Otra forma mediante la que se regula la expresión de los genes es la modificación química de algunos nucleótidos que componen la secuencia de nuestro genoma. La metilación del ADN, junto con la modificación de las histonas mencionada, forman parte del código epigenético.

La metilación del ADN consiste en la adición de un grupo metilo en las bases citosina, generalmente en las secuencias genómicas donde se repite el dinucleótido CG, llamadas islas CpG, que suelen aparecer dentro o cerca de los promotores de los genes o sitios de inicio de la transcripción. La presencia de estas metilaciones en las regiones reguladoras hace que unos genes se expresen y otros permanezcan inactivos. Determinadas enfermedades se producen no porque un gen esté dañado, sino porque el patrón de metilación de la región reguladora (promotor o interruptor génico) está alterado, lo que provoca que un gen se exprese cuando no debe, o viceversa.

Mediante un tratamiento químico del ADN (técnica del bisulfito) pueden identificarse las citosinas del genoma que se encuentran metiladas. Con el empleo de este método, el proyecto ENCODE se propuso elaborar un perfil de metilación de todo el ADN del genoma humano. Se analizaron 82 líneas celulares (tipos de células humanas inmortales mantenidas en cultivo), así como distintos tejidos humanos. Los resultados han puesto de manifiesto que las islas CpG presentan una metilación diferencial en los diversos tipos de células; el grado de metilación guarda relación con el empaquetamiento de la cromatina y, por tanto, con la accesibilidad que tienen a ella otras moléculas. Además, se ha observado que ciertas líneas celulares, como las cancerosas, muestran patrones de metilación aberrantes.

INTERACCIÓN CROMOSÓMICA

En los últimos años se ha descubierto un nuevo nivel de regulación de la expresión génica: la interacción física entre distintas regiones cromosómicas, a menudo separadas por cientos de miles de nucleótidos. De acuerdo con esta visión, la expresión de un gen no está regulada por un solo interruptor sino por muchos; una gran parte de ellos son compartidos con otros genes y se encuentran alejados del gen al que regulan. Se ha visto así que la cromatina forma una compleja red tridimensional de interconexión entre distintas partes del genoma. Estas regiones conectadas corresponden a zonas donde se están expresando genes activamente y, por tanto, se hallan menos enrolladas.

Para el análisis de esas interacciones ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas moleculares. Cabe destacar la técnica de captura de conformación cromosómica, o 3C, y su variante 5C (copia en carbón de la técnica 3C). Tales métodos han detectado cientos de interacciones entre distintas partes del genoma. Los pares de locus (genes o secuencias de ADN específicas) que interaccionan muestran una fuerte semejanza en los niveles de expresión génica y en la presencia de elementos funcionales específicos.

De este modo, un sitio de inicio de la transcripción (TSS, por sus siglas en inglés), el lugar donde comienza la transcripción de un gen, puede interaccionar con un promedio de 3,9 regiones de ADN distintas que podrían estar regulando su actividad, entre ellas regiones potenciadoras. Por tanto, estos potenciadores podrían ejercer su función en un gen muy alejado del lugar del genoma que ocupan. Otro dato revelador es que el 98 por ciento de los promotores interaccionan con otras regiones del ADN dentro del mismo cromosoma. Asimismo, el proyecto ENCODE ha determinado que la red de interconexión entre secuencias del genoma posee una arquitectura característica en cada tejido o tipo celular.

INTEGRAR LOS ELEMENTOS REGULADORES

Los distintos mecanismos de regulación mencionados no constituyen elementos aislados, sino que actúan conjuntamente para controlar la expresión de los genes, e incluso dependen unos de otros. El proyecto ENCODE ha elaborado unos complejos mapas de correlación que incluyen todos estos elementos. La herramienta permite conocer cómo influyen unos sobre otros, y cómo ello determina la regulación del genoma.

Por ejemplo, los factores de transcripción no se distribuyen de forma aleatoria, sino que se unen con preferencia a motivos específicos de los promotores que presentan un alto grado de metilación en las secuencias CpG. Los factores de transcripción, a su vez, pueden formar barreras alrededor de las cuales tienen lugar las modificaciones de las histonas y la remodelación de los nucleosomas.

Por otro lado, los ARN pequeños, uno de los tipos de transcritos no codificantes, se concentran con preferencia en la zonas promotoras de los genes, mientras que las metilaciones se sitúan principalmente en las regiones promotoras de genes reprimidos y, en menor medida, en los genes activos.

Como ya se ha comentado, cada tipo celular o tejido humano muestra unas características de regulación intrínsecas, pero también existen numerosas diferencias entre unas personas y otras. Las variaciones individuales se han analizado también en el proyecto ENCODE. Se ha hecho especial hincapié en las variantes alélicas (las diversas formas que puede presentar un gen en distintos individuos), entre ellas los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, de *single nucleotide polymorphism*). Estos consisten en la variación en la secuencia de ADN que afecta a una sola base, lo que en ocasiones puede dar lugar a una pérdida de función. Tales variantes funcionales se ubican no solo en las regiones codificantes, sino también en las no codificantes. Así, se ha comprobado que gran parte de los SNP se asocian a un fenotipo y, lo que resulta más sorprendente, que el 88 por ciento de ellos se sitúan en regiones no codificantes, como intrones y regiones intergénicas. Uno de los puntos importantes del estudio ha sido la identificación de ese tipo de variantes funcionales relacionadas con diversas enfermedades, desde afecciones inmunitarias hasta el cáncer.

Sin embargo, a pesar de la enorme cantidad de datos obtenidos, aún quedan numerosos elementos funcionales por definir, repartidos entre todos los tipos celulares que componen el cuerpo humano. Por ello, el NHGRI planea impulsar y financiar

durante cuatro años más las investigaciones que profundicen en el análisis de los elementos funcionales catalogados e incluyan otros tipos celulares, además de facilitar el desarrollo de nuevas técnicas que simplifiquen los estudios genómicos.

IMPLICACIONES DE LOS DESCUBRIMIENTOS

Hace tiempo se pensaba que las enfermedades se debían fundamentalmente a defectos en la función de las proteínas, pero cada vez se descubren más enfermedades asociadas a fenómenos de desregulación génica. Dicho de otro modo, los trastornos no tienen solo su origen en las regiones codificantes, sino también en sus regiones colindantes, en zonas del genoma muy alejadas de un determinado gen, en pequeños ARN no codificantes reguladores y en una amplia diversidad de factores externos que repercuten en la epigenética de nuestras células. Los cambios en la regulación de la actividad génica pueden alterar la producción de proteínas y los procesos celulares y desencadenar una enfermedad. Tan perjudicial puede resultar la falta de función de una proteína como su exceso, así como la expresión de una proteína en un momento o en un lugar inadecuado.

Muchos de los elementos funcionales descubiertos a menudo se relacionan con regiones de ADN responsables de varias enfermedades, lo cual sugiere que la regulación de gran parte de estos genes influye en el riesgo o la predisposición a padecer ciertas dolencias. De este modo, se han identificado cinco SNP asociados a la enfermedad de Crohn situados en la región de unión del factor de transcripción GATA2.

La amplia variedad de datos que está proporcionando el proyecto ENCODE está contribuyendo a desentrañar la base genética de diversas enfermedades. El conocimiento de la relación entre el funcionamiento del genoma y la salud permitirá determinar con antelación los factores de riesgo y ayudará a prevenir sus efectos o a desarrollar terapias que se ajusten a cada paciente. Cuanta más información se disponga de la estructura del genoma y del modo en que este se regula, más fácil resultará identificar los factores de riesgo genéticos relacionados con las enfermedades.

Desde la secuenciación del genoma humano en el año 2001, el conocimiento que teníamos sobre él ha cambiado de modo notable. El ambicioso proyecto ENCODE está teniendo repercusiones importantes, que van desde la redefinición del concepto de gen hasta la obtención de nuevas pistas sobre las causas genéticas de las enfermedades. También ha transformado la visión que teníamos sobre nuestro genoma, dejando atrás la idea de ADN «basura» con la que se definía una gran parte de él y cuya función desconocíamos.

PARA SABER MÁS

ENCODE: More genomic empowerment. George M. Weinstock en *Genome Research*, vol. 17, págs. 667-668, 2007.

A user's guide to the encyclopedia of DNA elements (ENCODE). The ENCODE project consortium en *PLoS Biology*, vol. 9, n.º 4, pág. e1001046, 2011.

An integrated encyclopedia of DNA elements in the human genome. ENCODE project consortium. B. E. Bernstein et al. en *Nature*, vol. 489, n.º 7414, págs. 57-74, 2012.

ENCODE project writes eulogy for junk DNA. E. Pennisi en *Science*, 337, n.º 6099, págs. 1159, 1161, 2012.

Viaje al interior del genoma. Stephen S. Hall en *Investigación y Ciencia*, diciembre de 2012.

Página web del proyecto ENCODE: **encodeproject.org**

Roger J. Mortimer es profesor de química física en la Universidad Loughborough, en el Reino Unido. Investiga en materiales orgánicos, polímeros y compuestos inorgánicos para el revestimiento de electrodos con aplicaciones en pantallas electrocrómicas, electrónica molecular, sensores y conversores de energía.



QUÍMICA

Materiales electrocrómicos

Algunos materiales cambian de color cuando se los somete a una ligera corriente eléctrica. Sus aplicaciones incluyen espejos que evitan los deslumbramientos, ventanas inteligentes y telas camaleónicas

Roger J. Mortimer

En respuesta a la aplicación de un pequeño voltaje —del orden de un voltio— algunos materiales modifican su color. La corriente eléctrica induce en ellos una reacción de reducción (ganancia de electrones) u oxidación (pérdida de electrones) que modifica el intervalo de energías en las que el compuesto interacciona con la luz visible. Por dicho motivo, tales materiales reciben el nombre de *electrocrómicos*.

La incorporación de una fina película de material electrocrómico a un circuito lo convierte en una célula electroquímica de color modificable. La sustancia puede depositarse sobre uno de los electrodos o disolverse en una solución electrolítica. Al cargar y descargar el circuito, se producen las reacciones de oxidación y reducción (denominadas de forma colectiva reacciones rédox) responsables del cambio de color.

Los dispositivos electrocrómicos han encontrado ya varias aplicaciones comerciales. En la actualidad, millones de automóviles cuentan con espejos que se oscurecen de forma automática para eliminar reflexiones molestas. También se han diseñado ventanas para aviones que reducen la cantidad de luz que entra en la cabina. Se ha propuesto asimismo emplear dichos materiales en pantallas de visualización, gafas protectoras y prendas de camuflaje. Las sustancias electrocrómicas permitirían también ahorrar energía. Un edificio dotado de un revestimiento electrocrómico en la techumbre podría reducir su consumo energético si en invierno adoptase un color oscuro (que absorbiera calor) y, en verano, un tono claro y reflectante. Los mismos materiales podrían asimismo usarse en ventanas que rebajasen la cantidad de luz entrante durante las horas más claras del día.

Una de las principales ventajas de los circuitos electrocrómicos reside en su bajo consumo. Una vez que el material ha cambiado de color, mantener el nuevo estado rédox solo requiere una aportación de energía muy escasa o incluso nula, gracias al «efecto de memoria» que poseen algunos de ellos. A menudo resulta posible cambiar entre varias coloraciones, lo que permitiría simplificar todo tipo de dispositivos que, de ordinario, emplean filtros de color. Los avances más recientes han permitido obtener tiempos de respuesta en el material del orden de 200 milisegundos, una facultad que abre la puerta a numerosas aplicaciones prácticas.

Aunque el efecto electrocrómico ya se observara a principios del siglo XIX, no fue hasta la década de los sesenta del pasado siglo cuando comenzaron a entenderse sus fundamentos y

EN SÍNTESIS

Los materiales electrocrómicos son aquellos que cambian de color al paso de una corriente eléctrica. Esta induce en ellos reacciones rédox que modifican las bandas de energía en las que el material interacciona con la luz visible.

Aunque el primer material electrocrómico se sintetizó en el siglo XVIII y las primeras referencias a dicho efecto datan del siglo XIX, el estudio detallado de sus propiedades no llegó hasta los años sesenta del siglo pasado.

Durante los últimos años, el desarrollo de nuevos materiales electrocrómicos ha conocido un crecimiento exponencial. Sus aplicaciones incluyen vidrios inteligentes, dispositivos de visualización y telas de camuflaje.



AUNQUE EL PRIMER MATERIAL ELECTROCRÓMICO se sintetizase en el siglo XVIII, los grandes avances solo han llegado durante los últimos años. En disolución, la concentración de los polímeros electrocrómicos gobierna la intensidad del color (*las concentraciones aumentan de arriba abajo*). Por su moderado coste y escaso consumo, estos materiales auguran prometedoras aplicaciones en pantallas de visualización, ventanas inteligentes y otros usos innovadores.

cuando se logró diseñar nuevos materiales de este tipo. Desde entonces, se han desarrollado cinco grandes clases de compuestos electrocrómicos. Comencemos por describirlas.

ÓXIDOS METÁLICOS

Al añadir oxígeno a los metales de transición (aquellos situados en los grupos centrales de la tabla periódica) se crean óxidos metálicos. Cuando estos se preparan en forma de películas delgadas, puede inducirse en ellas por medios electroquímicos un cambio de estado reversible: desde uno casi transparente, hasta otro dotado de un color intenso. En la mayoría de los casos, el óxido de metal reducido se corresponde con el estado coloreado. Este aparece como consecuencia de una intensa absorción óptica en alguna región del espectro visible, debida a la transferencia de electrones entre átomos con diferentes valencias. Se trata del mismo mecanismo que causa el bonito color azul brillante del zafiro.

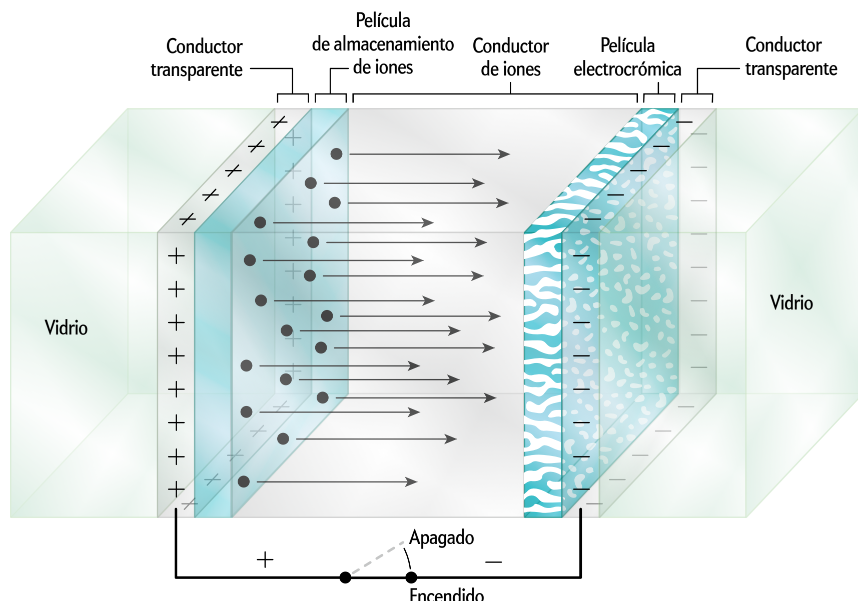
Un buen ejemplo nos lo proporciona el óxido de wolframio (WO_3). El máximo estado de oxidación del wolframio es 6 (cuando cede seis electrones; a fin de no confundirlos con cargas libres, dichos estados suelen designarse mediante números romanos: W^{VI}). Cuando adopta dicho estado, las películas delgadas de WO_3 adquieren un color amarillo pálido y poseen una banda de absorción electrónica en la región ultravioleta.

El cambio de color se consigue cuando, por reducción electroquímica, en el seno del material se generan zonas en las que el wolframio disminuye en una unidad su número de oxidación. Aunque todavía se debaten los detalles del mecanismo de coloración, se cree que la etapa esencial consiste en la inyección y extracción de electrones, así como la de protones o cationes metálicos inertes. Cuando solo una pequeña proporción de wolframio pasa de W^{VI} a W^{V}, la película adquiere un intenso color azul, causado por la transferencia de carga entre las bandas de valencia de las zonas adyacentes de W^{V} y W^{VI}. Sin embargo, si el cambio de estado afecta a una fracción mayor de la muestra, esta cobrará de forma irreversible un color bronce metálico, caracterizado por tonos rojizos o dorados.

VIOLÓGENO

Los viológenos son sales de 4,4'-bipiridina, un compuesto que contiene un par de anillos de carbono unidos, en cada uno de los cuales un átomo de carbono ha sido reemplazado por uno de nitrógeno. Además de sus propiedades electrocrómicas, los viológenos se utilizan como herbicidas, indicadores de estados rédox en reacciones químicas y mediadores de transferencia de electrones en sustancias adheridas a un electrodo.

La 4,4'-bipiridina resulta fácil de obtener y de manipular. Gracias a ello, las propiedades electrocrómicas de los viológenos



DISPOSITIVO ELECTROCRÓMICO compuesto de varias capas. En este caso, opera en el modo de absorción y transmisión (no en el de reflexión) y el material electrocrómico no es líquido, sino sólido. Los dos sustratos de vidrio se hallan recubiertos de conductores transparentes a fin de formar los electrodos. Uno de ellos ha sido revestido con una película electrocrómica; el otro, con una capa de material donador de iones. Entre ambos se intercala una capa de electrolito que conducirá los iones. Al cerrarse un circuito entre los electrodos, una pequeña corriente desplaza los iones (*puntos negros*) del electrodo positivo al negativo. Ese proceso alterará el color de la película.

han podido estudiarse con gran detalle. El más importante de estos compuestos recibe el nombre de metil viológeno, o N,N'-dimetil-4,4'-bipiridilo. De los tres estados rédox comunes del viológeno, el dicatión es incoloro cuando se encuentra puro (a menos que se produzca una transferencia óptica de carga con el contraanión). La reducción da lugar a un catión radical. Aunque los electrones libres de tales compuestos suelen dar lugar a especies muy reactivas, en este caso el catión se muestra bastante estable. Ello se debe a que el solapamiento de los orbitales electrónicos de la molécula de bipiridilo permite que el electrón radical se deslocalice y se desplace a través de la molécula; al mismo tiempo, los átomos de nitrógeno soportan parte de la carga y contribuyen a mantener el equilibrio eléctrico de toda la estructura.

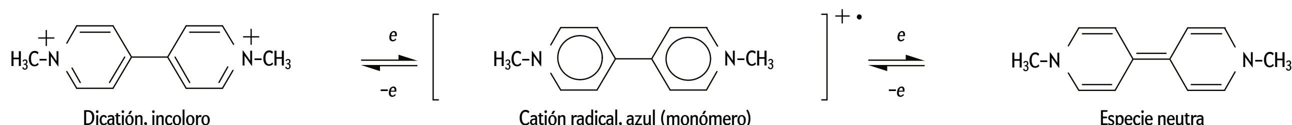
Los cationes radicales de los viológenos confieren a estos compuestos colores muy vivos. Debido a la transferencia de carga entre los átomos de nitrógeno, poseen un elevado coeficiente de absorción molar (una medida de la intensidad con la que absorben la luz de una cierta longitud de onda). En principio, si los sustituyentes de nitrógeno se escogen de tal manera que la energía de los orbitales moleculares alcance los niveles adecuados, el color del catión radical podría elegirse a voluntad. Por ejemplo, la elección de un grupo metilo ($–CH_3$, el alquilo más simple) o de otro alquilo (etilo, $–C_2H_5$, propilo, $–CH_7$, etcétera) producirá el color azul violáceo característico que da nombre a estos compuestos. Pero si se emplea un cianofenilo (un átomo de carbono unido mediante un enlace triple a otro de nitrógeno, y ligado a su vez a un anillo bencénico), el color será verde intenso. No obstante, las reacciones deben controlarse para evitar que el número de oxidación del compuesto se reduzca en más de una unidad. En caso contrario, el color resultante sería muy poco intenso, al no haber una transferencia de carga o una transición interna correspondiente a las longitudes de onda visibles.

POLÍMEROS CONDUCTORES CONJUGADOS

Una molécula conjugada es aquella en la que se alternan enlaces dobles y simples, y en la que los orbitales electrónicos de sus átomos constitutivos se hallan conectados de tal manera que los electrones se deslocalizan y transitan por ella con libertad. Algunas moléculas aromáticas exhiben una densidad electrónica uniforme, lo que tiende a estabilizarlas por un efecto de resonancia; en general, se muestran más estables de lo que cabría esperar a partir de la mera conjugación.

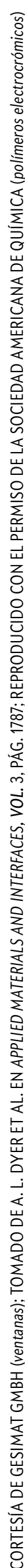
Algunas moléculas de ese tipo se basan en un anillo de cinco átomos de carbono en el cual uno de estos se halla sustituido por un heteroátomo. Algunos ejemplos nos los proporcionan los tiofenos (con azufre), los pirroles (nitrógeno) y los furanos (oxígeno). Otros compuestos, en cambio, constan de un anillo formado por seis átomos de carbono, combinado con otros de cinco que poseen diversos heteroátomos. También pertenece a esta clase la anilina, un anillo de seis carbonos unido al grupo NH_2. La oxidación química o electroquímica de tales sustancias produce polímeros conductores conjugados que presentan actividad eléctrica.

Muchos de estos materiales exhiben propiedades electrocrómicas cuando forman películas delgadas. Los polímeros de tiofeno y pirrol han sido los más estudiados durante los últimos años. En el estado oxidado conductor, estos polímeros contienen portadores de carga positivos (compensados por un dopaje de contraaniones) y poseen una estructura de bandas con electrones deslocalizados. Cuando se introducen en una solución electrolítica, se produce una reacción de reducción y un intercambio de cargas que deshace la conjugación electrónica. Como resultado, se genera la versión no dopada y eléctricamente neutra del compuesto.



EL VIOLÓGENO es un material electrocrómico compuesto por una molécula simétrica, en la que dos anillos de carbono poseen sustituyentes de nitrógeno. Cuando el dicatión (*izquierda*) se reduce y gana un electrón (*e*), forma un catión radical (ion positivo) de color azul (*centro*). Una nueva reducción que añada un segundo electrón generará la especie neutra (*derecha*).

AMERICAN SCIENTIST



LA VENTANA DE VIDRIO laminado con materiales electrocrómicos (en este caso, capas de color complementario de óxido de wolframio y azul de Prusia) puede mutar de transparente a azul oscuro. El voltaje aplicado controla la opacidad.

En un polímero puro, las propiedades electrocrómicas vienen determinadas por la magnitud de la banda electrónica prohibida; es decir, por la diferencia energética entre el nivel electrónico ocupado más alto y el nivel sin ocupar más bajo. Las películas delgadas con una banda prohibida de unos 3 electronvoltios (correspondiente a una longitud de onda de unos 400 nanómetros) son incoloras y transparentes en su forma pura; en cambio, cuando han sido dopadas, suelen absorber radiación visible. Las bandas prohibidas con una longitud de onda asociada de entre 650 y 730 nanómetros resultan muy absorbentes en su forma pura; una vez dopadas, sin embargo, la absorción de los portadores de carga libres es relativamente débil en la región visible, pues se traslada al infrarrojo cercano. Los polímeros con bandas prohibidas intermedias experimentan cambios ópticos acusados a lo largo de la región visible, por lo que pueden presentar varios colores.

COMPLEJOS DE COORDINACIÓN METÁLICOS

Al igual que en los viológenos, algunos complejos de coordinación metálicos se basan en cierta forma de la piridina; en concreto, de la 2,2'-bipiridina. Este compuesto químico actúa como ligando; es decir, como molécula que se une a un átomo de metal central (si bien un metal puede unirse a varios ligandos). Este puede encontrarse en estado de oxidación II, como ocurre con el hierro, el rutenio o el osmio, en cuyo caso resultarán complejos de coordinación con colores rojo, naranja y verde, respectivamente. El nombre de estos compuestos alude al tipo de unión que media entre el ligando y el metal. Conocido como enlace covalente coordinado, en él el ligando dona un par de electrones a uno de los orbitales vacíos del metal.

R = 2-etilhexil — Amarillo
R = 2-etilhexil — Naranja
R = 2-etilhexil — Rojo
R = 2-etilhexil — Magenta
R = Octil — Azul
R_1 = 2-etilhexil, R_2 = 2-etil — Verde
R = 2-etilhexil — Turquesa


AL COMBINAR LOS POLÍMEROS ELECTROCRÓMICOS creados por el grupo de John Reynolds, del Instituto de Tecnología de Georgia, puede obtenerse cualquier color. El grado de complejidad del polímero varía mucho de un color a otro. Las respectivas fotografías ilustran los estados neutro (coloreado) y oxidado (transmisor de luz) de cada polímero.



HOY, MILLONES DE AUTOMÓVILES disponen de espejos Gentex NVS para evitar deslumbramientos. Cuando se encuentran activados (*derecha*), su revestimiento electrocrómico produce una coloración azul verdosa que reduce la reflexión, pues rebaja la intensidad de la luz y absorbe parte de las longitudes de onda.

Los complejos de coordinación metálicos resultan prometedores como materiales electrocrómicos debido a su intensa coloración y a su reactividad rédox. Las débiles barreras energéticas que los caracterizan permiten diversos procesos de transferencia de electrones: de metal a ligando, de ligando a ligando, entre bandas de valencia de iones adyacentes, así como otras transiciones electrónicas asociadas a la región visible del espectro. Dado que en ellas intervienen los electrones de valencia, los procesos rédox alteran o eliminan sus propiedades de coloración. Su carácter electrocrómico proviene de la pérdida de la banda de absorción en la transferencia de carga del metal al ligando, cuando el estado rédox del núcleo central metálico pasa de II a III.

También se han investigado las propiedades electrocrómicas de las ftalocianinas, una importante familia de pigmentos industriales. Presentan en su núcleo un compuesto nitrogenado que recuerda a un trébol de cuatro hojas, con un anillo bencénico unido a cada una de ellas. En el centro de la estructura puede alojarse un átomo de un metal de transición, dando lugar a las metaloftalocianinas. Uno de dichos metales, el lutecio, forma el complejo lutecio bis(ftalocianina), que en películas delgadas exhibe propiedades polielectrocrómicas. Las películas depositadas comienzan con un color verde intenso y, al oxidarse, pasan a un tono que va del amarillo tostado al rojo. Tras una reducción, el estado de color verde puede mudar primero a una forma rédox azul y, después, a otra azul violácea.

AZUL DE PRUSIA

Creado a principios del siglo XVIII, el azul de Prusia fue el primer pigmento sintético. Cuenta por tanto con una larga historia de uso en pinturas, barnices, tintas de imprenta, cintas mecanográficas y papel de calco. De fórmula molecular $C_{18}Fe_7N_{18}$, forma cristales con estructura cúbica. Se sintetiza a partir del anión hexacianoferrato, el cual, a semejanza de los complejos de coordinación metálicos, posee un átomo central de hierro rodeado por seis ligandos de carbono y nitrógeno unidos mediante triple enlace.



EN VEZ DE CORTINAS, estas ventanillas para aviones incorporan un dispositivo electrocrómico que las oscurece progresivamente (*de izquierda a derecha*) a voluntad del pasajero.

El pigmento constituye un compuesto de valencia mixta; es decir, que contiene un elemento que se encuentra en más de un estado de oxidación. En este caso se trata del hierro, que adopta los estados Fe^{II} y Fe^{III}. El intenso color del compuesto se debe a la transferencia de carga entre las bandas de valencia de esos átomos. La oxidación o la reducción dan lugar a estados de color amarillo verdoso y pálido. Otros pigmentos similares, los cianometalatos de metal, constituyen otra clase relevante de compuestos de valencia mixta.

UN PASADO COLORIDO

El cambio de color causado por la ganancia o pérdida de electrones se conoce desde principios del siglo XIX. En 1815, Jöns Jacob Berzelius, del Instituto Karolinska de Estocolmo, refirió que el óxido de wolframio puro, de color amarillo pálido, cambiaba a un azul intenso tras una reducción por calentamiento bajo una corriente de hidrógeno seco. Hoy en día, el óxido de wolframio sigue siendo el material electrocrómico más estudiado. En 1824, Friedrich Wöhler llevó a cabo en Alemania una reducción similar con sodio metálico. Asimismo, observó un brillo metálico en un compuesto de óxido de wolframio combinado con litio ($LiWO_3$). Creyendo que se debía a la formación de una aleación metálica, acuñó la expresión «bronces de wolframio».

En 1843, el ingeniero escocés Alexander Bain patentó un precursor rudimentario de la transmisión por fax, el cual se basaba en la generación electroquímica de un compuesto de azul de Prusia. El invento consistía en una aguja de hierro dulce, apoyada sobre un papel húmedo previamente impregnado con ferrocianuro potásico. Al aplicar una corriente eléctrica, la oxidación de la punta de hierro (con carga positiva) formaba iones férricos a partir del metal, que iban desgastando el hierro a medida que se combinaban con iones ferrocianuro para producir el pigmento azul de Prusia. De esta manera, el electrodo de hierro marcaba un trazo oscuro en todos los puntos en los que tocaba el papel.

Un efecto similar ocurría en el cambio de color fotoquímico característico de la cianotipia, una versión temprana de la fotografía ideada en Inglaterra por el astrónomo William Herschel. Hacia 1880 ya se fabricaban grandes cantidades de papel para estas copias azules, muy usadas en planos de ingeniería y arquitectura. Su gran disponibilidad hizo de la cianotipia un proceso fotográfico apto para grandes

reproducciones, uso que mantuvo hasta finales del siglo xx.

La primera sugerencia para fabricar un dispositivo electrocrómico apareció en 1929, en una patente presentada en Londres. Se basaba en la obtención de iodo molecular a partir de iones ioduro por electrogeneración. Luego, el iodo inducía la oxidación química de un precursor de tinte, gracias a lo cual se lograba una coloración brillante.

El primer cambio de color (de incoloro a azul) fue anunciado en 1930. Aprovechaba la reducción electroquímica de un óxido de wolframio sólido que revestía a un electrodo. En 1942 se patentó un sistema de impresión electrocrómica, llamado «papel de escritura electrolítica», en el que primero se impregnaba el papel con una solución de partículas de óxido de wolframio, óxido de molibdeno o ambos. Se formaba entonces una imagen azul grisácea como resultado de una reacción de transferencia de electrones. El electrodo actuaba como estilo, coloreando el papel allí por donde lo atravesaba. En 1951, Eugene O. Brimm y otros investigadores de la compañía Union Carbide and Carbon, de Nueva York, consiguieron cambios de color reversibles en un óxido de sodio y wolframio sumergido en un ácido acuoso. Algo después, en 1953, Thaddeus Kraus, de la empresa Balzers AG, en Liechtenstein, propuso aprovechar el efecto decolorante reversible del óxido de wolframio para un dispositivo de visualización.

El término *electrocromismo* fue acuñado en 1961 por John R. Platt, de la Universidad de Chicago, a partir de su trabajo en los Laboratorios Bell. Sin embargo, el proceso al que se refería no se basaba en reacciones rédox, sino en el efecto Stark molecular. Este ocurre cuando, en presencia de un intenso campo eléctrico, las líneas espectrales de una molécula se desplazan y se desdoblan. En aquel caso, Platt lo había aplicado a ciertas moléculas de tinte polarizables.

En 1962, Solomon Zaromb, de la corporación Philco, publicó varios estudios sobre la electrodeposición de iones de plata procedentes de soluciones acuosas sobre una superficie transparente de vidrio conductor. Cuando los iones de la solución se reducían a plata metálica, formaban una película que recubría el vidrio. Después, dicha película se desprendía por oxidación y los iones plata regresaban a la solución. Cabía esperar que tales películas reflejasen la luz incidente si eran continuas, pero que absorbiesen la luz si la plata se organizaba en gránulos. Zaromb



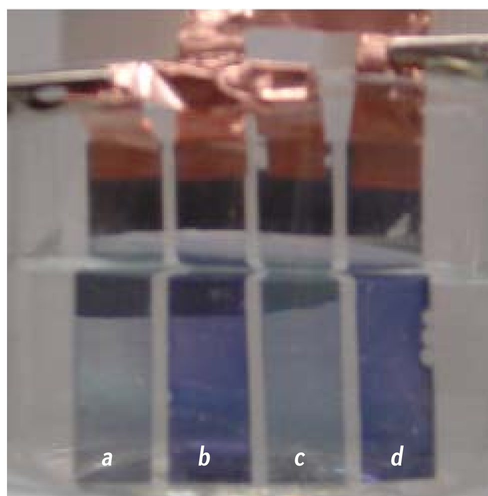
ESTA PELÍCULA ELECTROCRÓMICA obtenida por impresión en bobina incluye una célula fotovoltaica impresa, lo que la convierte en un dispositivo electrocrómico flexible y energéticamente autónomo. La película magenta (*izquierda*) se decolora por oxidación (*derecha*).

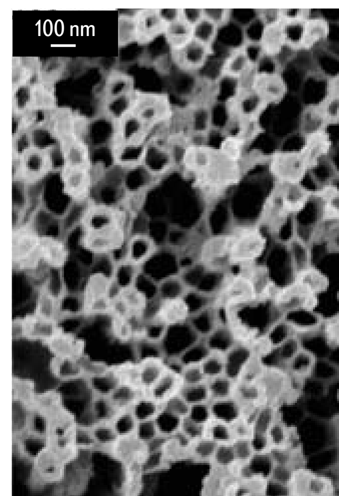
llamó a su sistema «modulador de luz con electroplacas» y defendió que constituía una posible base para una pantalla. Aunque la deposición de metales reflectantes parezca una idea atractiva para ahorrar energía en edificios, solo han seguido esta línea ciertos estudios basados en compuestos de bismuto, plomo, y codeposiciones de bismuto y cobre.

Quizá la primera empresa que intentó sacar partido comercial de la electrocromía fuese la división holandesa de Philips, que inició sus estudios hacia 1960 y logró su primera patente en 1973. Concibió un prototipo para visualizar imágenes que utilizaba un viológeno orgánico acuoso: el viológeno heptilo (1,1'-*n*-heptilo-4,4'-bipiridilo). Al mismo tiempo, en el Reino Unido, Imperial Chemical Industries desarrolló otros dispositivos similares basados también en el empleo de viológenos. Durante los años setenta, el grupo de Donald J. Barclays, de IBM, y la compañía Texas Instruments estudiaron otros posibles usos del viológeno heptilo, si bien sus trabajos no se dieron a conocer hasta después de la suspensión de su programa de investigación.

Como quiera que ninguno de esos estudios despertaron gran interés, hoy la mayoría de los investigadores se inclinan por atribuir a Satyen K. Deb la primera propuesta exitosa de un dispositivo electrocrómico. Deb, por entonces en la American Cyanamid Company, obtuvo en 1969 una coloración electrocrómica al aplicar un campo eléctrico de 1000 voltios por centímetro a través de una película delgada de óxido de wolframio, la cual había sido previamente depositada en vacío sobre cuarzo; un efecto que bautizó como «electrofotografía».

Sus películas no se hallaban sumergidas en un electrolito ionizado, sino expuestas al aire. Ello daba a entender que los contracationes móviles necesarios para la reacción provendrían del agua adsorbida en la película, o bien de la





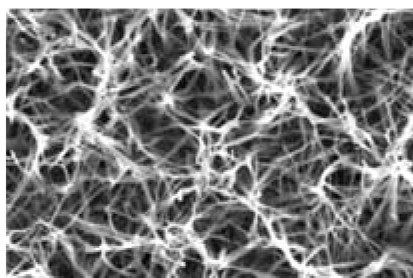
PARA ABREVIAR EL TIEMPO DE RESPUESTA de los materiales electrocrómicos, pueden sintetizarse polímeros con forma de nanotubo. Este dispositivo con cuatro ventanas (*izquierda*) consta de una película formada por dichos nanotubos (*a la derecha, en una micrografía de barrido electrónico*). El material se oscurece en el estado reducido (*b* y *d*) y es pálida en su estado oxidado (*a* y *c*).

que se había incorporado en el interior, ionizada al mismo tiempo que el wolframio. En aquella ocasión, Deb sugirió que el color procedía de los centros F, defectos del cristal que atrapan electrones y que tienden a absorber luz en el visible. Se sabe que este mecanismo actúa sobre cristales de haluros metálicos cuando son calentados o irradiados en un campo eléctrico.

Hoy es frecuente señalar el último artículo publicado por Deb en 1973 como el verdadero origen de las técnicas electrocrómicas modernas. Su dispositivo electrocrómico (la película de óxido de wolframio) se hallaba sumergido en un electrolito ionizado. El óxido de wolframio viene suscitando un enorme interés desde entonces, sobre todo en relación con el desarrollo de diversos prototipos para ventanas inteligentes. Junto con Deb, también Claes G. Granqvist, de la Universidad de Uppsala, es considerado una autoridad internacional en la electrocromía de óxidos metálicos.

A partir de un informe publicado en 1978 por Vernon D. Neff, de la Universidad de Kent, sobre la preparación de azul de Prusia en una película delgada y sus mutaciones de color por medios electroquímicos, se han estudiado exhaustivamente las propiedades electrocrómicas de esos cianometalatos. Mientras tanto, desde finales de los setenta, los materiales orgánicos han suscitado también gran interés, sobre todo en el campo de los polímeros conductores conjugados. En 1979 se descubrió la propiedad electrocrómica de uno de esos polímeros, cuando G. Brian Street y su grupo de IBM anunciaron la electrosíntesis de polipirrol en película delgada. Hoy es posible preparar tales películas por oxidación electroquímica, ya sea a partir de una solución del monómero o de otras de polímeros solubles. Estas últimas, en particular, resultan especialmente adecuadas para la producción a gran escala.

Desde los años ochenta hasta ahora, John Reynolds, hoy en el Instituto de Tecnología de Georgia, y sus colaboradores han contribuido de manera decisiva al estudio de los polímeros conductores conjugados. Su grupo ha manipulado la composición de polímeros electroquímicos basados en tiofenos para crear el primer conjunto de materiales solubles que despliegan toda la gama de colores. Se espera que este hallazgo, un verdadero hito científico, repercuta en el desarrollo de una mayor diversidad de pantallas orgánicas electrónicas de bajo



UN REVESTIMIENTO de nanohilos de óxido de titanio se hace crecer sobre vidrio en un proceso de un único paso. De esta manera, la capa electrocrómica se muestra menos oscura cuando está desactivada.

coste, así como en aplicaciones para vidrios tintados.

DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS

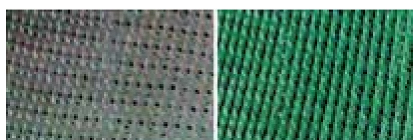
Los dispositivos electrocrómicos (DEC) se comportan como pilas electroquímicas recargables, cada una de las cuales contiene al menos dos electrodos separados por una capa de electrolito ionizado, en forma de líquido, gel o sólido. El material electrocrómico puede estar disuelto o en forma de películas sólidas. El cambio de color tiene lugar durante la carga o descarga, mediante la aplicación de un potencial eléctrico. Los DEC basados en líquidos operan por electrólisis de los materiales electrocrómicos solubles.

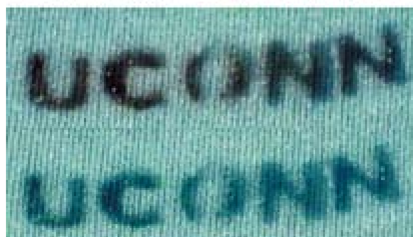
Según las características del diseño, los DEC funcionan o bien en modo de absorción y transmisión, o bien en modo de reflexión. Todos ellos requieren al menos un electrodo transparente. Los dispositivos que operan en modo de absorción y transmisión (como anteojos, gafas protectoras o ventanas inteligentes) requieren un segundo electrodo posterior también transparente. Los que actúan en modo de reflexión (paneles, espejos antideslumbrantes, etcétera) emplean un metal pulido o un revestimiento reflectante en el lugar del electrodo posterior o detrás de este.

En los DEC de absorción y transmisión, el cambio de color más acusado se produce en uno de los electrodos, el primario. La reacción rédox del electrodo opuesto, o secundario, se elige de tal modo que el cambio de color resulte imperceptible. Como alternativa, también puede añadirse un material electrocrómico para que dicha transformación resulte complementaria a la producida en el electrodo primario, a fin de que refuerce el contraste entre el estado coloreado y el desvaído.

Entre los dispositivos de coloración complementaria estudiados hasta ahora se encuentran los que contienen una película delgada de azul de Prusia (que al oxidarse pasan de incoloros a azules) y los de óxido de wolframio (a los que les ocurre lo mismo, pero por reducción). Otra combinación la hallamos en el polímero conductor conjugado polietilenodioxitiofeno, o PEDOT, que por reducción pasa de azul claro a azul intenso, con el poli(butil viológeno), que al reducirse deja de ser incoloro y cobra una tonalidad púrpura. En fecha reciente se han investigado DEC de tipo reflectante sobre sustratos metalizados, cuyos electrodos se confeccionan mediante técnicas de modelado lineal, serigrafía y deposición metálica al vapor. En estos dispositivos, se oculta el cambio de color del electrodo secundario.

Los sustratos empleados en los electrodos contienen una película conductora transparente aplicada sobre vidrio o sobre tereftalato de polietileno (PET), un polímero flexible. Esta suele ser de un óxido conductor, como el de indio, dopado con estaño, flúor o antimonio. La capa de electrolito que separa los dos electrodos de un DEC debe ser conductora de iones, a la vez que aislante de electrones. Además, ha de ser transparente en la banda de longitudes de onda utilizadas, debe presentar una ventana electroquímica amplia y una baja volatilidad. En los dispositivos DEC de película delgada, el electrolito aporta también los contraiones móviles que, durante la coloración y la decoloración, en-





LA IMPRESIÓN de polímeros electrocrómicos sobre elastano (o *spandex*, el popular tejido deportivo) permite emplear el material a modo de electrodo. Al oxidar el estado neutro del polímero (*arriba a la izquierda*), este se torna verde (*arriba a la derecha*). Un modelo sobre el que se ha pulverizado el material muestra el mismo cambio (*abajo*).

TOMADO DE J. CHEN ET AL. EN *ACS NANO*, VOL. 8, PÁG. 6633; REPRODUCIDO CON EL PERMISO DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE QUÍMICA (*nanohilos*)
TOMADO DE M. A. INVERNALE ET AL. EN *ACS APPLIED MATERIALS AND INTERFACES*, VOL. 2, PÁG. 296; REPRODUCIDO CON EL PERMISO DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE QUÍMICA (*tejido de elastano*)

tran y salen de las capas enfrentadas de material electrocrómico sólido.

Un ejemplo de un dispositivo con dicha estructura lo hallamos en la ventana inteligente para edificios desarrollada por la empresa alemana Gesimat. En ellas, las capas electrocrómicas se componen de sólidos de óxido de wolframio y azul de Prusia, separadas por poli(vinilbutiral), un electrolito de polímero sólido conductor de iones empleado de manera habitual en la laminación del vidrio. El óxido de wolframio y el azul de Prusia proporcionan un mecanismo de coloración complementario. Cuando el electrodo recubierto de azul de Prusia actúa como ánodo y el recubierto de óxido de wolframio es el cátodo, ambos materiales toman su color azul característico. Al invertir la polaridad, los dos se decoloran. Hace poco, Gesimat ha iniciado una línea de fabricación piloto de laminados de vidrio electrocrómico con dimensiones de hasta 1 por 2,4 metros.

Con todo, el éxito comercial más sobresaliente en este campo lo hallamos en los espejos de oscurecimiento automático NVS (Night Vision Safety) de la corporación Gentex, pensados para suprimir los reflejos. Sus dos electrodos consisten en una superficie de vidrio revestida de óxido de indio dopado con estaño (con su cara conductora hacia el interior) y en una superficie metálica reflectante. Ambos distan entre sí una fracción de milímetro. Ese finísimo espacio se rellena con un gel que contiene dos materiales electrocrómicos, sin un electrolito adicional. La composición exacta del espejo no se conoce con exactitud, pero cabe inferir que las dos especies químicas electroactivas son un viológeno sustituyente que colorea el cátodo, y una tintura de tiazina (un anillo de seis átomos formado por cuatro carbonos, un nitrógeno y un azufre) o una especie de fenilendiamina (un ingrediente común en los tintes de cabello, basado en un anillo de carbonos unido a dos grupos NH_2) en el ánodo.

Una vez activado el espejo, las especies emigran a sus respectivos electrodos y, como resultado de la combinación de los dos estados cromáticos de los materiales electrocrómicos, se genera un color azul verdoso. Dicho tono reduce el deslumbramiento, pues rebaja la intensidad de la luz y absorbe parte de sus longitudes de onda. El transporte por migración tiene lugar porque no existe ningún electrolito inerte. Una vez iniciado el proceso de coloración electrocrómica, los productos se desprenden por difusión de sus electrodos respectivos y se reúnen en la solución interpuesta, en la que se produce una reacción que regenera las especies incoloras originales. Este tipo de dispositivo electrocrómico requiere, pues, una pequeña corriente permanente para reponer las especies electroactivas que se hayan eliminado durante los procesos rédox. Esta reacción regenerativa evita la necesidad de decolorar por medios eléctricos, ya que el color se desvanece por sí mismo cuando el espejo se desactiva. Por esa razón, los espejos Gentex NVS se denominan a veces «autoborradores».





LA COMPAÑÍA PORTUGUESA YNVISIBLE utiliza materiales electrocrómicos para elaborar tarjetas, listas de artículos e incluso anuncios impresos. En este ejemplo, al pulsar sobre una promoción en un billete de avión, un panel electrocrómico muestra el precio de la oferta.

CORTESÍA DE YNVISIBLE (*billete de avión*)

Aunque no funcione por efecto electrocrómico, merece la pena destacar el ingenioso sistema de control del retrovisor Gentex NVS. Un detector fotosensible encarado hacia atrás controla la entrada de luz deslumbrante. Sin embargo, la luz diurna también lo activaría, lo que oscurecería el retrovisor en multitud de situaciones inapropiadas. Para evitarlo, se utiliza un segundo detector, orientado hacia delante y programado de manera que, al recibir luz diurna, anule cualquier operación del detector controlador. De esta manera, el aparato responde solo en la oscuridad de la noche.

En combinación con PPG Aerospace, Gentex ha ampliado su línea de productos y ha desarrollado ventanas interactivas para aviones. Al sustituir las usuales cortinillas de plástico, estos sistemas logran amortiguar la luz ambiente según la voluntad de tripulantes y pasajeros. Comercializadas por PPG Aerospace con el nombre Alteos Interactive Window Systems, se trata de las primeras ventanas electrocrómicas del mundo capaces de cambiar de un estado claro a otro de extrema oscuridad, pasando por una confortable claridad intermedia, sin más que pulsar un botón. Estas ventanas inteligentes se estrenaron en 2011 en un vuelo comercial del Boeing 787 Dreamliner y en vuelo privado del Hawker Beechcraft King Air 350i.

UN FUTURO BRILLANTE

La investigación y desarrollo de la electrocromía prosigue su avance. No solo está aumentando la variedad de materiales y dispositivos, sino que no cesan de aparecer nuevas aplicaciones. Hoy en día, una meta a largo plazo de numerosos estudios consiste en producir a gran escala ventanas electrocrómicas que atenúen la luminosidad de espacios interiores. Su aplicación generalizada aportaría sustanciales ahorros en climatización. Varios grupos de investigación han intentado aumentar la transparencia de las ventanas electrocrómicas en su estado incoloro, a fin de que no se oscurezcan en exceso. Un buen ejemplo lo hallamos en el grupo de Kuan-Jiuh Lin, de la Universidad Nacional de Chung Tsin, en Taiwán, que ha desarrollado un método para hacer crecer nanohilos de óxido de titanio sobre vidrio, en un proceso de una sola etapa. La porosidad de los nanohilos permite que las ventanas mantengan un índice de refracción menor y que adquieran una coloración gris pálida cuando se desea bloquear la luz.

Si bien las primeras investigaciones se centraron en las pantallas de visualización, estas perdieron su interés cuando las de cristal líquido inundaron el mercado. No parece probable que la electrocromía llegue a las grandes pantallas de televisión. Sin embargo, sí podría resultar de utilidad en pantallas multicolor de bajo coste para otras aplicaciones, como papel electrónico, señales o etiquetas reutilizables. Gracias a la gama completa de colores que ofrecen los polímeros electrocrómicos solubles, el grupo de Reynolds ha empleado pulverizadores e impresión por chorro de tinta para crear varios prototipos; entre ellos, un sustrato con varias películas de numerosos colores que exhibe todo tipo de matices. En 2012, Reynolds y sus colaboradores aplicaron técnicas de impresión en bobina para revestir sustra-

tos de PET flexibles y les incorporaron un dispositivo fotovoltaico impreso. Gracias a ello, lograron un DEC energéticamente autónomo.

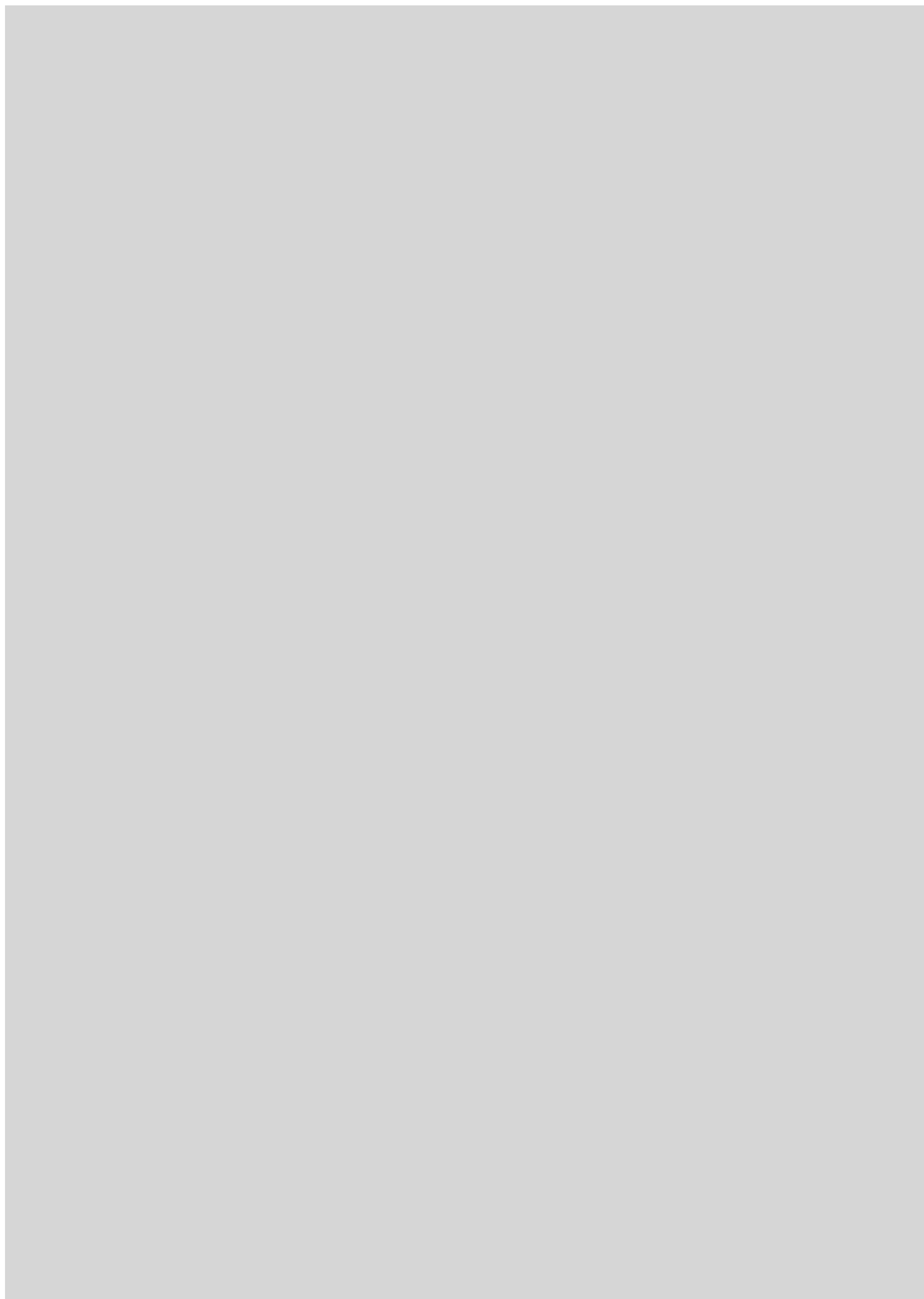
Una de las limitaciones más persistentes de los dispositivos electrocrómicos ha sido siempre su relativa tardanza en cambiar de color. Ese tiempo de respuesta queda determinado por la tasa de difusión de los iones durante el proceso rédox. Si el espesor de las películas electrocrómicas se reduce, disminuirá la distancia de difusión de los iones, pero tal vez las delgadas películas carezcan por sí solas del contraste necesario para exhibir una buena coloración. Por ello, Sang Bok Lee, de la Universidad de Maryland, y otros investigadores han explorado la posibilidad de utilizar nanotubos. Lee y su equipo hacen crecer tubos de polímero electrocrómico cuyas paredes solo miden de 10 a 20 nanómetros, pero cuya longitud asciende a cientos de nanómetros. Para generar la reacción rédox, basta con que los iones se difundan a través del ancho de la pared, lo que permite reducir el tiempo de cambio de color a unos 10 milisegundos. Pero, por otro lado, la longitud del nanotubo permite un buen contraste de color. En 2012, el mismo grupo ideó varios métodos para generar nanotubos híbridos de varios polímeros que reforzasen aún más el color. Han logrado películas de nanotubos que trabajan tanto en modo de transmisión como en el de reflexión, lo que en principio permitiría usarlos en pantallas y ventanas.

Otro de los fines más perseguidos es la fabricación de tejidos de color cambiante. Estos materiales «camaleónicos» podrían emplearse para camuflaje, como pantallas integradas en la vestimenta o incluso popularizarse como prendas de moda. Dado que los polímeros electrocrómicos pueden usarse en disolución, resultan también adecuados para estarcirse sobre tejidos flexibles. Además, su bajo consumo energético implica que podrían operar con electrodos flexibles. Gregory A. Sotzing, de la Universidad de Connecticut, y otros investigadores han estado trabajando en un tejido de elastano (o *spandex*, muy usado en ropa deportiva) electrocrómico, en el que la intensidad del color queda modulada por el estiramiento de la tela. El propio elastano se convierte en un electrodo cuando se lo empapa en una solución de polímero conductor. Entre dos capas del tejido elástico se empareda una película de gel electrolítico y, al revestir ambas superficies con polímeros electrocrómicos, se obtiene un tejido reversible con un color en cada cara. El grupo de Sotzing investiga también la posibilidad de crear filamentos y fibras electrocrómicas que, después, puedan tejerse para confeccionar ropa.

Pese a contar con una larga historia, las aplicaciones de los materiales electrocrómicos han experimentado un avance exponencial durante los últimos años. La gran paleta de colores disponible en la actualidad, sus rápidos tiempos de respuesta y la facilidad en el manejo de estos productos parece estar favoreciendo su ubicuidad, un consumo menor y un reducido coste. Su porvenir no solo se promete brillante, sino rico en colores y contrastes.

PARA SABER MÁS

Handbook of inorganic electrochromic materials. C. G. Granqvist. Elsevier, 1995.
Electrochromism: Fundamentals and applications. P. M. S. Monk, R. J. Mortimer y D. R. Rosseinsky. VCH, 1995.
Electrochromic organic and polymeric materials for display applications. R. J. Mortimer, A. L. Dyer y J. R. Reynolds en *Displays*, vol. 27, págs. 2-18, 2006.
Electrochromism and electrochromic devices. P. M. S. Monk, R. J. Mortimer y D. R. Rosseinsky. Cambridge University Press, 2007.
Chromic phenomena: Technological applications of colour chemistry. P. Bamfield y M. G. Hutchings. Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2010.



por Dan Larhammar, David Lagman y Xesús M. Abalo

Una mirada a la retina

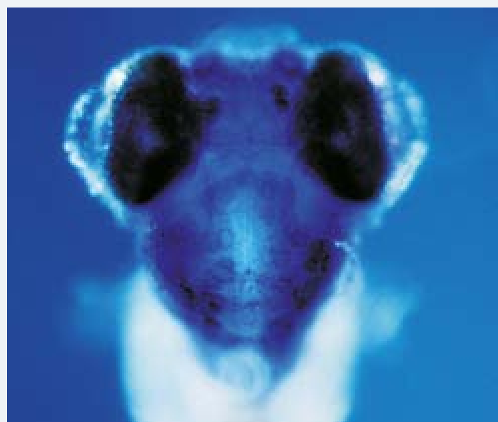
El pez cebra constituye una herramienta muy útil en la investigación de los trastornos visuales humanos

El pez cebra (*Danio rerio*) es uno de los modelos más habituales usados en ciencia para estudiar las bases moleculares desencadenantes de dolencias tan dispares como el alzhéimer, el párkinson o la retinitis pigmentosa. Constituye por tanto un instrumento valioso para investigar los trastornos visuales. Pero ¿qué ventajas conlleva el uso del pez cebra, si se tiene en cuenta que otros modelos animales habituales, como las ratas y los ratones, presentan una mayor cercanía filogenética con los humanos?

En la retina de todos los vertebrados coexisten dos tipos de células fotorreceptoras: los conos, encargados de la percepción del color, y los bastones, responsables de la visión en condiciones de baja intensidad de luz. Los humanos poseemos una región en la parte central de la retina, la fóvea, sobre la cual inciden la mayoría de los haces de luz y que se halla compuesta exclusivamente por conos. En cambio, los roedores carecen de fóvea. Además, los humanos presentamos una visión tricromática; percibimos tres colores básicos, el rojo, el verde y el azul (con sus respectivas combinaciones) gracias a tres tipos de conos. Los múridos, por su parte, son dicromáticos, lo que devalúa su uso en este tipo de investigaciones.

A diferencia de los roedores, el pez cebra posee una retina en la que predominan los conos; podría equipararse a una gran fóvea. Por otro lado, el conocimiento casi total del genoma del animal ofrece posibilidades extraordinarias de manipulación genética con las que simular deficiencias de ciertas proteínas, posibles causantes de enfermedades. Asimismo, la especie presenta un desarrollo embrionario muy rápido: tres días después de la fecundación, el embrión ya cuenta con un sistema visual funcional (ya responde a estímulos luminosos). No obstante, esta funcionalidad está basada únicamente en la actividad de los conos, puesto que los bastones no son activos hasta los diez días. Ello ofrece un período de siete días para estudiar una retina desprovista de bastones, un aspecto muy interesante dada la abundancia de trastornos visuales asociados a la disfunción de los conos.

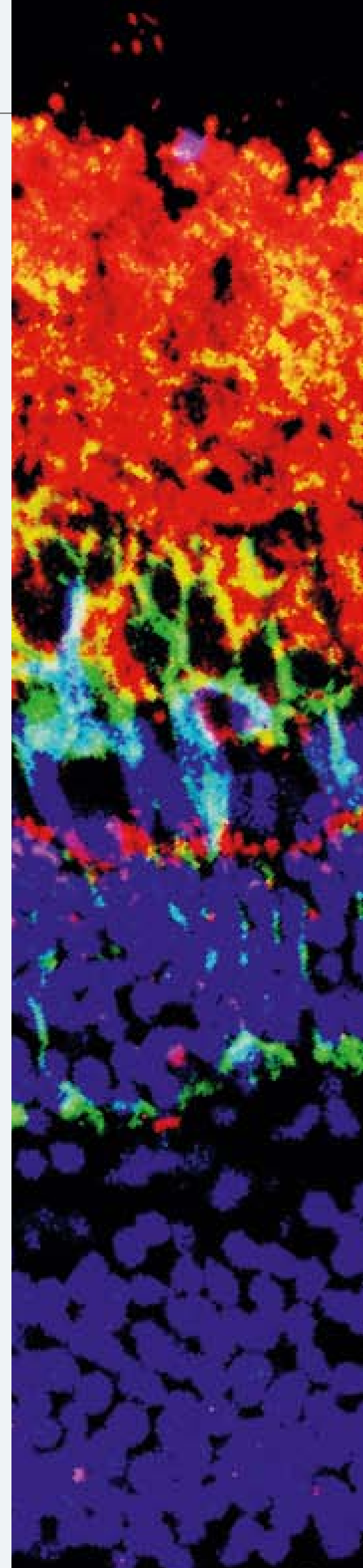
—Dan Larhammar, David Lagman y Xesús M. Abalo,
Departamento de neurociencia
Universidad de Uppsala



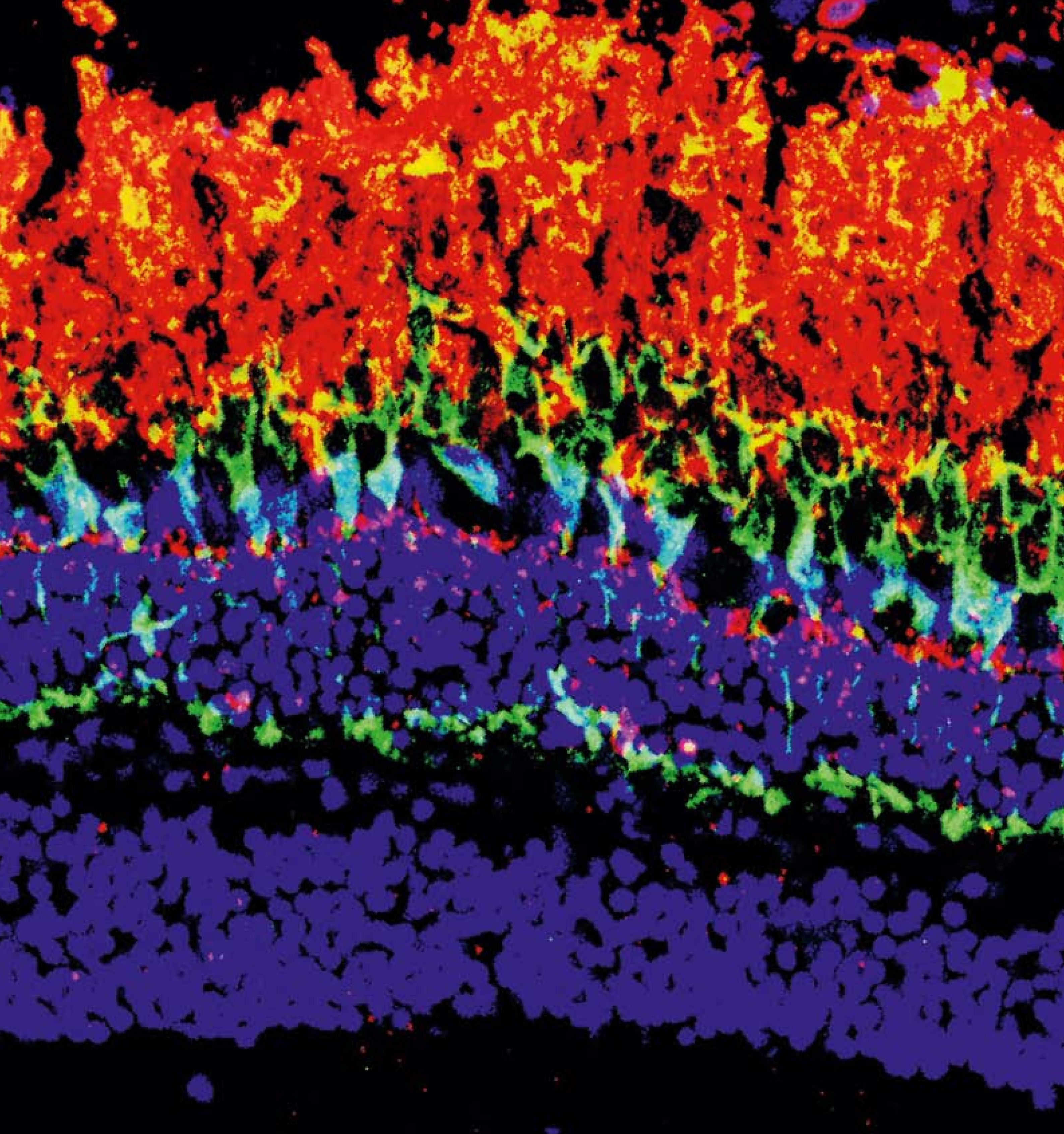
En una larva de pez cebra de cinco días de edad ya se aprecia la magnitud de los ojos a ambos lados de la cabeza.



Individuo adulto de pez cebra, con el rayado característico que le da nombre.



XESÚS M. ABALO (*larva y retina*); DAVID LAGMAN (*pez cebra*)



Sección transversal de una retina de pez cebra adulto. En ella se observa la estratificación de la retina, común en todos los vertebrados. Las capas de neuronas (*azul*) se intercalan con capas de fibras nerviosas (*negro*); en la parte superior se distinguen un tipo especial de conos, los conos dobles (*verde*), y los segmentos externos de los bastones (*rojo*). (Imagen obtenida aplicando inmunohistoquímica para detectar los distintos tipos neuronales mediante diversas combinaciones de anticuerpos acoplados a moléculas fluorescentes.)

por John L. Heilbron

John L. Heilbron es profesor emérito de historia en la Universidad de California en Berkeley.



La ruta hacia el átomo cuántico

¿Qué camino siguió Niels Bohr hace cien años para cuantizar las órbitas de los electrones en su modelo atómico?

En otoño de 1911, el físico danés Niels Bohr inició en Inglaterra una estancia posdoctoral de un año con «estúpido e impetuoso coraje». Así describió su estado de ánimo en una carta a su prometida, Margrethe Nørlund. Bohr iba a necesitar todo ese coraje en su ruta hacia el revolucionario átomo cuántico de 1913.

A Bohr no le faltaban razones para creer que estaba destinado a hacer historia. En 1908, con 23 años, había ganado la medalla de oro de la Real Academia de Ciencias Danesa con un estudio experimental y teórico sobre los chorros de agua, publicado por la Real Sociedad de Londres. Su tesis doctoral, sobre la teoría electrónica de los metales, era tan avanzada que nadie en Dinamarca fue capaz de evaluarla.

Escogió la Universidad de Cambridge, en el Reino Unido, a fin de trabajar con Joseph John (J. J.) Thomson, ganador del premio Nobel de física de 1906 por el descubrimiento del electrón [*véase* «El electrón y su familia», por Jaume Navarro; Investigación y Ciencia, febrero de 2013]. Bohr descubrió que Thomson, «un genio capaz de guiar a todo el mundo», estaba demasiado concentrado en sus propias ideas como para atender a un extranjero cuyo inglés apenas podía entender. «Cuentan que sería capaz de plantar al mismo rey —escribió Niels a su hermano Harald—, lo cual dice más en Inglaterra que en Dinamarca.»

Aunque se hubiera interesado por él, a Thomson le habría costado percibir que se hallaba ante un físico matemático maduro. Por si fuera poco, la especialidad de Bohr era la crítica. Tras descubrir errores en los artículos de Thomson en el curso de su tesis, intentó con poca fortuna llamar la atención del profesor sobre ellos.



NIELS BOHR y su mujer Margrethe hacia 1930.

COLECCIÓN UHLENBECK, INSTITUTO DE FÍSICA AMERICANO, SPL

Thomson estaba desarrollando las consecuencias del modelo de átomo que había propuesto en 1903, inapropiadamente apodado «pudin de pasas» porque constaba de anillos concéntricos de electrones que giraban en un espacio esférico que no ofrecía ninguna resistencia y actuaba como si estuviera dotado de carga eléctrica positiva. Thomson había conseguido elucidar mediante su modelo las propiedades periódicas de los elementos, la formación de moléculas simples, la radiactividad, la dispersión de rayos X y de partículas β, y la razón entre el peso atómico y el número de electrones de un elemento.

En Cambridge, Bohr se dedicó a atender conferencias y a leer vorazmente. Disfrutó con las clases de Thomson y con *Aether and matter* (1900), el tratado sobre el éter y la materia de Joseph Larmor, profesor de matemáticas en la misma cátedra que había ocupado Isaac Newton, que proponía y elaboraba un sistema del mundo en el que los electrones se concebían como vórtices estables en el éter. «Cuando leo algo tan bueno y ambicioso —escribió Bohr a Margrethe—, ardo en deseos de intentar lograr algo semejante.»

El modelo nuclear

En febrero de 1912, Bohr se desplazó a la Universidad Victoria de Manchester para trabajar sobre radiactividad en el laboratorio de Ernest Rutherford. Su ardor no había disminuido un ápice: «No puedo contener mi coraje, de tan impetuoso». Rutherford estuvo a la altura de sus expectativas: «Un investigador de primera línea, extremadamente capaz, en muchos sentidos más que Thomson, aunque tal vez menos dotado».

Sin duda, Rutherford superaba a Thomson como director de investigación. A su llegada al laboratorio, Bohr encontró a varios investigadores estudiando las implicaciones del modelo nuclear del átomo introducido por Rutherford en 1911. Para

explicar la reflexión de las partículas α en láminas delgadas de metal detectada por sus colaboradores, Rutherford había propuesto que toda la carga positiva del átomo de Thomson se concentraba en un núcleo central diminuto.

Bohr se sumó a esos trabajos por la vía crítica, su vía natural. Al calcular la transferencia de energía entre una partícula α y los electrones atómicos, Charles Galton Darwin, el teórico de Rutherford, no había tenido en cuenta la resonancia que se produce cuando el tiempo de paso de la partícula a través del átomo coincide con la frecuencia natural a la que oscilan los electrones perturbados.

Al intentar mejorar los cálculos, Bohr descubrió que algunos modos de oscilación de un anillo de electrones en el plano de su órbita crecían hasta disgregar el átomo. Según los principios aceptados de la física, esta inestabilidad mecánica no tenía arreglo. Bohr había dado en su tesis con otros ejemplos generales del fracaso de las teorías de la radiación del calor y del magnetismo, que concedían a los electrones tanta libertad como permitía la mecánica estadística. El modelo nuclear resultaba atractivo para Bohr precisamente porque hacía muy evidente este fracaso.

El modelo tenía otras ventajas. Distinguía claramente entre los fenómenos químicos y los radiactivos, que para Bohr estaban relacionados, respectivamente, con la estructura electrónica y con el núcleo. Esta inferencia —que ahora nos parece clara— no era entonces tan directa. Ni siquiera Rutherford hacía esta distinción, ya que creía que los rayos β y γ se originaban en la corteza electrónica.

Es más, el modelo nuclear, combinado con la visión de Rutherford de la partícula α como un núcleo sin corteza electrónica, llevaba casi directamente al concepto de número atómico. Los físicos sabían que la partícula α correspondía a un átomo de helio sin dos electrones; por consiguiente, su núcleo debía poseer carga 2, lo que, a su vez, implicaba que el hidrógeno tenía carga 1, el litio 3, y así sucesivamente.

Espoleado por el interés de Rutherford, Bohr redactó en junio o julio de 1912 un memorándum que aplicaba al modelo nuclear la idea de los cuantos de energía de Max Planck, a fin de abordar los problemas que había considerado Thomson y determinar el tamaño de los átomos.

Pese a que el memorándum era eminentemente cualitativo, en un punto esencial Bohr contraponía un cálculo preciso a las estimaciones de Thomson. Tanto la teoría de dispersión de Rutherford como los experimentos exigían que, en el caso del helio, el peso atómico (4) fuera el doble que el número de electrones (2). En cambio, Thomson solo había podido concluir de sus cálculos y de sus experimentos sobre la dispersión de rayos X y partículas β que el número de electrones de un elemento era aproximadamente el triple que su peso atómico.

Niels comunicó a su hermano Harald los primeros resultados prometedores: «Puede que haya descubierto algo sobre la estructura del átomo. De hallarme en lo cierto, no estaría sugiriendo la naturaleza de una posibilidad (o de una imposibilidad en la teoría de J. J. Thomson) sino tal vez un pequeño fragmento de realidad».

Bohr, sin embargo, siguió a Thomson en algunas de las cuestiones que discutió con Rutherford, como las propiedades periódicas de los elementos (determinadas a partir de las condiciones de estabilidad impuestas a sus estructuras electrónicas), o el enlace entre átomos en moléculas simples (basado en el intercambio de electrones).

A fin de avanzar en los cálculos, Bohr introdujo un postulado ad hoc por analogía con la teoría de la radiación de Planck: si la energía cinética de cada electrón fuera proporcional a la frecuencia de su órbita, el electrón no radiaría ni sucumbiría a oscilaciones inestables. Bohr propuso la hipótesis de que la constante de proporcionalidad era una fracción de la constante de Planck, h.

La numerología de Balmer

La serie de tres artículos de Bohr sobre la constitución de átomos y moléculas fue publicada en la revista londinense *Philosophical Magazine* entre julio y noviembre de 1913. El segundo y el tercero, que trataban de la distribución periódica de los elementos y del enlace molecular bajo el influjo de Thomson, no eran en sí mismos revolucionarios. Lo que hace memorable a la «trilogía» es el primer artículo de la serie, que trata sobre el espectro del hidrógeno, un problema que Bohr no abordó hasta febrero de 1913.

Johann Jakob Balmer había propuesto en 1885 una fórmula aritmética simple que relacionaba las frecuencias de las series espectrales del hidrógeno. A la pregunta de un colega de si podía explicar la fórmula, Bohr respondió que las series espectrales eran demasiado complejas, pero aun así consideró la cuestión. Más tarde explicaría que se dio cuenta inmediatamente de que podía calcular la razón entre energía cinética y frecuencia orbital a partir del modelo que había presentado a Rutherford seis meses antes.

Ese modelo inicial constaba de un único estado fundamental en el que, por definición, los electrones habían radiado toda la energía de la que la naturaleza les permitía desprenderse. El modelo no explicaba por qué el átomo emitía tantas frecuencias distintas. Bohr pudo ver la significación de la fórmula de Balmer porque alrededor de Año Nuevo había desarrollado su modelo en respuesta a una notable serie de artículos de John William Nicholson, un físico matemático a quien había conocido en Cambridge.

Nicholson había conseguido relacionar las frecuencias de muchas de las líneas no identificadas en los espectros solar y nebulares con las oscilaciones de los electrones del modelo nuclear en dirección perpendicular al plano de los anillos. A diferencia de las oscilaciones en el plano, las perpendiculares al plano pueden ser estables. Nicholson calculó el momento angular de los electrones a partir de sus frecuencias de rotación, derivadas a su vez de datos espectrales. El momento angular de cada electrón correspondía, muy aproximadamente, a un pequeño múltiplo entero de $h/2\pi$.

El hallazgo de Nicholson tuvo lugar poco después de la celebración del Consejo de Física Solvay de 1911, en el que Planck, Rutherford, Albert Einstein, Hendrik Antoon Lorentz y otros líderes de la física habían debatido sobre los problemas de la teoría de la radiación. La discusión se había centrado en el concepto de cuanto de energía. La energía de los osciladores armónicos simples que, según Planck, representaban partículas materiales capaces de emitir y absorber radiación, era siempre un múltiplo entero de la frecuencia de oscilación. Un oscilador emitía o absorbía radiación cuando su frecuencia natural coincidía con la de la radiación (ν), y lo hacía en cantidades discretas de energía ($E = h\nu$), o cuantos.

Dado que las relaciones de Nicholson eran sorprendentemente exactas y que su modelo, como el de Bohr, era a la vez nuclear y cuantizado, Bohr tuvo que tomarlo en serio. Reacio a investigar las series espectrales, imaginó tentativamente que un electrón ligado ocupaba una secuencia de estados excitados y que, en el descenso hacia el estado fundamental, radiaba energía en la forma propuesta por Nicholson.

LA FÓRMULA DE BALMER

La clave del átomo de Bohr

La fórmula de Balmer expresa, mediante una álgebra simple, las frecuencias de algunas de las líneas espectrales del hidrógeno:

$$\nu_n = R(1/2^2 - 1/n^2)$$

donde ν_n corresponde a la n-ésima línea de Balmer y R a la constante universal de frecuencia de Rydberg (llamada así en honor del espectroscopista sueco Johannes Rydberg, quien generalizó la fórmula de Balmer a otros elementos). A partir de la teoría de la radiación de Max Planck, Niels Bohr expresó la ecuación en unidades de energía, multiplicando ambos términos por la constante de Planck, h. De este modo identificó la energía del electrón en su n-ésimo estado con el segundo término, $-Rh/n^2$. El primer término corresponde entonces al valor negativo de la energía del segundo nivel ($n = 2$), y la fórmula indica que una línea de Balmer se origina en el salto de un electrón del átomo de hidrógeno del nivel n al nivel 2.

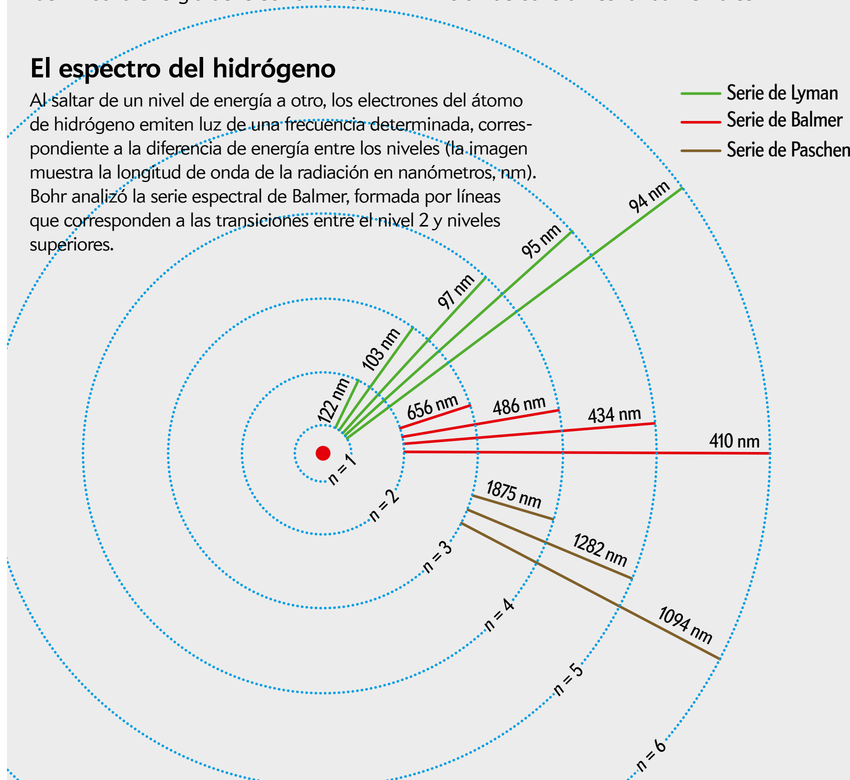
Para calcular R, Bohr igualó la energía del nivel n, $-Rh/n^2$, a la energía cinética T_n de un electrón orbital de su modelo cuántico del átomo:

$$T_n = 2\pi^2 me^4/h^2n^2$$

donde e y m son la carga y la masa del electrón. Igualando ambas expresiones de la energía, Bohr pudo expresar R en función de constantes fundamentales.

El espectro del hidrógeno

Al saltar de un nivel de energía a otro, los electrones del átomo de hidrógeno emiten luz de una frecuencia determinada, correspondiente a la diferencia de energía entre los niveles (la imagen muestra la longitud de onda de la radiación en nanómetros, nm). Bohr analizó la serie espectral de Balmer, formada por líneas que corresponden a las transiciones entre el nivel 2 y niveles superiores.



Bohr introdujo en el modelo un número entero (n) para cuantificar los niveles de energía del electrón. Suponiendo que la energía cinética en la n-ésima órbita era proporcional a la frecuencia orbital multiplicada por n, Bohr obtuvo fácilmente el resultado de Nicholson sobre el momento angular y el resultado adicional de que la constante de proporcionalidad era $h/2$. Así, al examinar la fórmula de Balmer, Bohr tenía ya en mente una serie basada en números enteros.

La relación $E = h\nu$ permitió a Bohr pasar de la aritmética a la física multiplicando la fórmula de Balmer por la constante de Planck, h. Una vez convertida en una ecuación para la energía, Bohr pudo identificar la energía cinética de los distintos niveles con los términos correspondientes de la nueva fórmula. De esta manera expresó la constante de Rydberg, el parámetro principal de la fórmula de Balmer, a partir de la constante de Planck y de la carga y masa del electrón.

El éxito en el cálculo de la constante de Rydberg tuvo un coste muy elevado para los físicos. Si bien el salto de un electrón desde un nivel superior a la segunda órbita explicaba el origen de una línea de Balmer, la explicación del mismo salto quedaba fuera del alcance de la física. Rutherford se dio cuenta enseguida de que para poder «vibrar» a la frecuencia apropiada, el electrón debería saber con antelación a qué nivel iría a parar. Le costaba aceptar que el electrón pudiera anticiparse de este modo, o hablar de frecuencias en ausencia de vibraciones.

La respuesta de Bohr fue que los físicos debían «renunciar» —un término al que Bohr recurriría con frecuencia— a la posibilidad de describir con exactitud ciertos procesos a escala atómica.

A ojos de Einstein, la situación era aún peor. Planck había igualado la frecuencia mecánica de oscilación a la frecuencia de la luz emitida. Había podido hacerlo porque la frecuencia de un oscilador armónico simple no depende de su energía. Las oscilaciones de un radiador excitaban directamente el «éter», o el campo de radiación. Pero los saltos de Bohr implicaban a dos órbitas con periodos distintos. La frecuencia de la luz emitida no se correspondía con el movimiento del electrón que supuestamente la producía, en contradicción con el tratamiento que los físicos solían dar a la radiación.

Bohr sintió entonces la responsabilidad de buscar un fundamento sólido para el postulado básico de su átomo cuántico, según el cual la razón entre la energía cinética y la frecuencia orbital en el nivel n es proporcional a $nh/2$. No le resultó fácil hacerlo. El primer artículo de la trilogía contiene cuatro principios distintos y en buena medida contradictorios.

Dos de ellos desarrollan la analogía con la teoría de la radiación de Planck que informaba el postulado de Bohr. El tercer principio es de otro tipo. Requiere que, en los saltos entre órbitas adyacentes muy alejadas del núcleo, donde el electrón apenas siente sus efectos, la frecuencia de radiación sea asintóticamente igual (tienda a coincidir con) a la frecuencia de las órbitas, que son asintóticamente iguales entre sí. Se trata de una versión preliminar del principio de correspondencia de Bohr, según el cual el valor numérico de una magnitud física calculado mediante la teoría cuántica coincide, en el límite apropiado, con su valor numérico calculado mediante la física ordinaria o clásica.

A finales de 1913 Bohr había descartado algunas de las ideas de Planck por considerarlas «equívocas» (el átomo nuclear no es un oscilador armónico simple); adoptó entonces el principio de correspondencia como fundamento principal. También conservó un cuarto principio, el único que se recuerda hoy, que estipula la cuantización del momento angular y que se sigue del principio fundamental sin más que sustituir la razón entre energía cinética y frecuencia orbital por su equivalente mecánico, el momento angular multiplicado por π. En la medida en que impone una condición sobre la órbita, el cuarto principio difiere conceptualmente de los otros tres, que relacionan la órbita con la radiación emitida por un electrón en un salto cuántico.

Tolerante con la ambigüedad

Resulta admirable la habilidad de Bohr para combinar ideas contradictorias y su coraje a la hora de pedir sacrificios a físicos como Einstein, Planck o Lorentz. Como hemos visto, no le faltaba confianza en sí mismo. Pero una cosa es tener un coraje impetuoso y otra muy distinta tolerar la ambigüedad.

La correspondencia con su familia, y en particular con Margrethe, nos ayuda a entender esa faceta del pensamiento de Bohr. Antes de aventurarse en el mundo del átomo, Bohr había desarrollado una doctrina sobre la existencia de verdades múltiples y parciales: cada una de ellas contendría algún fragmento de realidad, pero solo conjuntamente proporcionarían una descripción o representación completa. «Hay tantas verdades distintas —escribió a Margrethe—, que casi diría que esta es mi religión, la idea de que es cierto todo lo que tiene valor.»

El análisis de la serie de Balmer reflejaba para Bohr la verdad parcial de la teoría de la radiación de Planck, así como la de la física clásica. Bohr pudo haber elaborado la noción de verdad parcial a partir de los escritos de Harald Høffding, su profesor de filosofía, y la obra de William James, *Pragmatism* (1907), autor del que acaso le hablara Høffding.

Una parte hasta ahora inédita de la correspondencia familiar, publicada en fecha reciente por el autor y Finn Aaserud (*Love, literature, and the quantum atom: Niels Bohr's trilogy revisited*, obra a la cual refieren todas las citas de este artículo), nos permite explorar unas conexiones que habían sido objeto de especulación por parte de historiadores y filósofos, a partir de la evidencia posterior y tenue que proporciona el principio de complementariedad de Bohr.

Como a todo el mundo, cuando no estaba entusiasmado con sus ideas a Bohr le asaltaban las dudas. La correspondencia muestra que Margrethe desempeñó un papel importante, tal vez esencial, ayudando a Bohr a capear sus estados de ánimo y convenciéndole de que era el gran científico por el que lo tenía su sistema de apoyo danés.

En muchas de las cartas Bohr le pedía ayuda para liquidar sus deudas, en referencia a los logros que debía alcanzar dados sus grandes dotes, al apoyo que había tenido para desarrollar tales dotes y, tal vez, a la perspectiva que había adquirido en Inglaterra. La única manera de saldar estas deudas era logrando algo grande. El revolucionario átomo cuántico de 1913 le permitió avanzar un primer pago a sus acreedores imaginarios, incluidos Thomson y Rutherford.

Artículo original publicado en *Nature* 498, págs. 27-30, 2013.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

PARA SABER MÁS

On the constitution of atoms and molecules. N. Bohr en *Philosophical Magazine*, vol. 26, págs. 1-25, 1913.
Love, literature, and the quantum atom: Niels Bohr's trilogy revisited. F. Aaserud y J. L. Heilbron. Oxford University Press, 2013.



por José Molero



José Molero es catedrático de economía aplicada en la Universidad Complutense de Madrid y director del Instituto de Estudios de la Innovación.

La innovación en España

El problema no son solo los recortes, sino una debilidad estructural de gran calado y una falta de estrategia a largo plazo

En la actual situación de crisis económica, las miradas se vuelven a menudo hacia la innovación tecnológica como elemento dinamizador de un posible cambio. ¿Es nuestro sistema de innovación lo bastante eficiente para activar esta transformación? ¿Qué papel desempeña en nuestra economía? ¿Y en el mundo?

En la Unión Europea contamos con el Índice Sintético de Innovación (ISI) de Eurostat. Calculado a partir de 25 indicadores parciales, permite comparar la actividad innovadora de los países miembros. Sobre un máximo de 1, a España le correspondía en 2012 un ISI de 0,407, claramente por debajo de la media europea (0,544) y muy alejado del de los países más innovadores: Suiza (0,835), Suecia (0,747) y Alemania (0,720). En esta clasificación, España ocupa la posición número 16 (de 27). A escala mundial, el Índice Global de Innovación evalúa a 142 países [*véase* «Indicadores de innovación», *en este mismo número*]. Con una puntuación de 49 en una escala del 0 al 100, a España le corresponde este año la posición 26.

Pero si queremos ir más allá de estas puntuaciones, debemos analizar nuestro sistema productivo. Si observamos su evolución a lo largo de las últimas décadas, veremos que —a diferencia de la construcción o el turismo— los sectores más tecnológicos nunca han tenido un gran peso en nuestra economía. En 2010, su valor añadido apenas llegaba al 6 por ciento del total manufacturero (a más de tres puntos por debajo de la media europea). Ello resulta alarmante, puesto que se trata de los sectores con mayor ritmo innovador e internacionalización. (El lector podrá ahondar en este análisis en *Structural change, competitiveness and industrial policy: Painful lessons from the European periphery*, Routledge, en prensa).

Otro rasgo de nuestro sistema productivo es que concentra la innovación en pocos sectores. En 2011, tres agrupaciones industriales (química-farmacia, maquinaria y equipo, y material de transporte) concentraban más del 31 por ciento de los recursos de I+D de las empresas españolas; otras dos agrupaciones de servicios (información y comunicaciones, y actividades profesionales, científicas y técnicas) superaban el 40 por ciento. En total, estos cinco sectores concentraban más del 71 por ciento de los recursos.

Fijémonos también en el tamaño de las empresas. En España abundan las pequeñas y las «micro», y escasean las grandes. Ello reduce la capacidad de generar y gestionar conocimiento nuevo, las posibilidades de internacionalización, la disponibilidad de recursos financieros y la productividad. En suma, no favorece la innovación.

En cuanto al modo de innovar, Eurostat distingue cuatro tipos de empresas: innovadores estratégicos, innovadores intermitentes, modificadores de tecnología y adoptantes de tecnología. Según este criterio, en España más de la mitad de las empresas innovadoras son adoptantes; las otras categorías se hallan escasamente representadas, en particular los innovadores estratégicos.

¿Qué decir de la internacionalización? Si tenemos en cuenta la actividad de I+D de filiales de empresas extranjeras establecidas, España presenta una situación muy asimétrica: mientras que para su economía la actividad de esas empresas resulta crucial (se estima en torno al 40 por ciento del total de I+D de las empresas), para los grupos matrices esa inversión solo en pocos casos resulta insustituible por otras posibles localizaciones.



Si analizamos la evolución de los recursos, veremos que hasta finales del decenio anterior se produjo un incremento de los mismos (públicos y privados). En cambio, ello no se ha traducido en un aumento de los resultados (patentes internacionales, por ejemplo). Nuestro sistema de innovación es, por tanto, poco eficiente.

Asimismo, en los últimos años se ha producido un empeoramiento de la financiación pública. Ya en 2011 se observó —por primera vez desde que se tienen datos— un retroceso del gasto en I+D+i y un descenso de los recursos que las empresas dedican a la innovación.

¿Qué puede hacerse entonces para mejorar la innovación en España? Primero, las actuaciones no deberían centrarse solo en el incremento de los recursos, sino también en la revisión de la organización institucional y otros factores que puedan estar obstaculizando la creación de innovación y su impacto económico. Segundo, debería mejorar la relación entre el sector público y el privado; no solo en el sentido tradicional de transferencia de conocimiento del primero al segundo, sino también en el de creación de nuevas instituciones y fomento de la «fertilización» cruzada. Tercero, es urgente modificar la tipología innovadora dominante de nuestras empresas para orientarla a la creación de técnicas novedosas que puedan hacer liderar nuevos mercados o sectores.

En suma, no se trata solo de potenciar el sistema de innovación que ya tenemos, sino de remodelarlo para mejorar su eficiencia.

THINKSTOCK

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

El caviar

¿Por qué es un alimento tan caro?

Por caviar debemos entender exclusivamente las huevas de esturión. Fueron los persas quienes le pusieron este nombre y los primeros en consumirlo de forma abundante, atribuyéndole poderes de potenciación física. De Persia pasó a Grecia (en textos de Aristóteles ya se nombraba dicho producto); apareció luego en la civilización romana y se fue transmitiendo hasta hoy.

Existen 26 especies de esturión; cada una produce un tipo de caviar. Las más representativas son del género *Huso* y *Acipenser*. El caviar de esturiones *Huso* recibe el nombre de beluga. Los del género *Acipenser* se denominan según la especie: baeri (*A. baerii*), nacari (*A. naccarii*), trans (*A. transmontanus*), oscietra (*A. gueldenstaedtii* o *A. persicus*) y sevruga (*A. stellatus*).

El consumo de caviar suele asociarse con las clases sociales altas. Pero no siempre ha sido así. Antiguamente, los pescadores del mar Caspio se comían los despojos de esturión (caviar) para poder sobrevivir; y en el siglo xix, en EE.UU., en las zonas de los ríos Delaware y Hudson era consumido por las clases pobres debido a su bajo coste, consecuencia de la extracción masiva.

En la actualidad, el precio medio del caviar ronda los 2000 euros por kilogramo. Pero quienes deseen degustar el exclusivo caviar del esturión beluga albino del mar Caspio iraní deberán pagar unos 20.000 euros el kilo.

El secreto de su coste no se encuentra ni en las propiedades nutricionales, ni en la elevada proporción de lecitina, ni en la presencia de vitaminas A, B2, B6, B12 y C, ni en el contenido proteico (25 por ciento), ni en los característicos matices gustativos yodados. El motivo principal es la escasez.

Derivado de ese alto precio, uno de los problemas que ha sufrido el caviar es, sin duda, la caza furtiva que durante el siglo xx casi propició la extinción de los esturiones salvajes. Para combatir esta amenaza, la CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) acordó en Harare en 1997, y ratificó en el marco del Acuerdo de París en junio de 2001, la protección de los esturiones y los peces espátula del orden Acipenseriformes, puesto que representan un recurso biológico y económico renovable de gran valor.

Se obligó entonces a especificar en las etiquetas de caviar el tipo de esturión. Así, «BAE» indica *Acipenser baerii*; «W», que es salvaje (*wild*); y «C», de cautividad. Asimismo, debía indicarse si el producto se había sometido a algún proceso térmico y se prohibió etiquetar como caviar las huevas de otros pescados.

También se resaltó la importancia de realizar un seguimiento de las poblaciones y de estudiar su estructura genética. Siguiendo estas recomendaciones, científicos del Instituto de Ciencias de la Conservación de la Universidad de Stony Brook y del Instituto Sackler de Genómica Comparativa del Museo Americano de Historia Natural, encabezados por Phaedra Doukakis, repitieron un estudio sobre el caviar comercializado en el área de la ciudad de Nueva York que ya se había realizado antes de las normas CITES. En julio de 2012 publicaron los resultados en la revista *PLOS ONE*. La investigación, que comprobó la veracidad de las etiquetas mediante el análisis del ADN mitocondrial, concluyó que el caviar etiquetado de forma fraudulenta había disminuido casi en un 50 por ciento. Un éxito del acuerdo internacional de conservación.

Otra medida para proteger el esturión salvaje y evitar su alto precio fue el impulso del esturión en cautividad. Ello ha llevado a ampliar los estudios sobre el proceso de producción. Inicialmente, los esturiones alevines requieren un tratamiento especial de las aguas en las que se desarrollan. Hasta los 30 meses no definen su sexo; por tanto, hasta casi los tres años no pueden separarse los machos de las hembras. Los machos se destinan al consumo de la carne de pescado; las hembras deben esperar un mínimo de siete años para producir huevas y son fértiles solo una vez al año.

Para controlar la calidad del caviar se realizan ecografías y biopsias. Cuando la textura es óptima se extraen las huevas, se filtran y se lavan con agua y sal. Se depositan luego en unos recipientes con sal para su maduración. La sal es la base de la curación, ya que extrae (por ósmosis) agua de las huevas. Transcurridos entre uno y dos meses, se colocan estas en los recipientes definitivos, con un cuidado extraordinario para no modificar su calidad. Dado que este proceso resulta extremadamente caro, el precio del caviar sigue siendo elevado, aunque sea de cautividad.

En gastronomía, el caviar se ha asociado con el vodka y el cava. También con el huevo (los huevos fritos con caviar ofrecen una resultado gustativo muy interesante). Y en esta misma línea «mar y montaña», hallamos la combinación del tuétano con caviar que el restaurante El Bulli valorizó de forma extraordinaria.

Durante muchos años se intentó reproducir una textura similar a la del caviar. Pero hasta el desarrollo en 2003 de la técnica de la esferificación no se consiguió una imitación aproximada [*véase* «La esferificación», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, abril de 2008]. Desde entonces, a ciertas preparaciones esferificadas se las denomina «falso caviar». En la actualidad ya se comercializan falsos caviares de frutas y de aceites.



CORTESÍA DE CAVIAR NACARI S. L.



ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL 2013

LA INVENCIÓN EN UNA ENCRUCIJADA

Muchos pensamos en la invención como algo que surge de la mente de una sola persona. Se trata esta de una idea romántica, mas sin relación apenas con el auténtico proceso de creación subyacente a las técnicas que moldean hoy nuestro mundo. Esa labor es cada vez más colaborativa; no constituye tanto un destello de genialidad cuanto un rosario de muchas luces, múltiples y diversas mentes conectadas en una red social. La creciente conectividad entre las distintas partes del mundo y las aportaciones de científicos e ingenieros de todos los continentes abre nuevas oportunidades para la creación. En este informe especial se celebran tales desarrollos y se comentan también algunos de los problemas que plantean.

—La redacción

ILUSTRACIONES DE KOTRYNA ZUKAUSKAITE

EN SÍNTESIS

Las grandes corporaciones solían mediar entre las ideas gestadas en el laboratorio y el mercado. En el futuro esa tarea recaerá en alianzas de Gobiernos, empresas y universidades (pág. 60).

Para lograr que distintos Estados e instituciones colaboren con eficacia para generar técnicas novedosas, es necesario establecer nuevas normas (pág. 62).

China es, en cuanto a innovación, la estrella en alza. Pero al mirar más de cerca, se observa que gran parte del trabajo se realiza en laboratorios de corporaciones multinacionales que operan en suelo chino (pág. 64).

Aunque los distintos países difieren en cuanto a producción tecnológica, resulta posible comparar su eficiencia en la explotación de la investigación científica (pág. 66).

México presenta dificultades para traducir su trepidante capacidad científica en técnicas de interés comercial. Su Gobierno actual está intentando cambiar la situación, en parte incentivando el retorno al país de científicos expatriados (pág. 68).

POLÍTICA CIENTÍFICA

¿QUIÉN FINANCIARÁ LA PRÓXIMA GRAN IDEA?

Robots en miniatura, fármacos personalizados y otras técnicas que podrían cambiar nuestra vida permanecen a la espera en el laboratorio, faltos de financiación. He aquí cómo resolver el problema

David J. Kappos

EL MUNDO ACTUAL nos proporciona una enorme variedad de productos y servicios, cuidados para la salud y tratamientos médicos, accesorios y caprichos; todos ellos entran en escena con tal rapidez que apenas logramos retenerlos. Empezamos sorprendidos y atónitos ante las maravillosas innovaciones y acabamos por depender de ellas. ¿Cómo nos las arreglábamos antes sin GPS, teléfonos inteligentes, escáneres cerebrales o cirugía ocular con láser?

Estos avances, que nos proporcionan comodidad, seguridad y salud, son fruto de descubrimientos fundamentales realizados hace decenios en ciencia de materiales, informática, biología, química o tecnologías de la información, entre otros campos de conocimiento. Y la celeridad con que brotan las nuevas ideas en los laboratorios, sean universitarios o estatales, no parece estar aflojando. La producción científica, medida por la publicación de artículos o las solicitudes de patentes, prosigue con un ritmo igual o mayor que en cualquier tiempo pasado. Además, dado que China, India y otros países han entrado con fuerza en la escena científica, cabe prever grandes avances en el futuro.

Sin embargo, la gran ciencia no se traduce automáticamente en tecnología mundial de primer orden. Esa transición exige tiempo, dinero y paciencia, bienes que resultan escasos últimamente. De hecho, la forma tradicional de llevar los descubrimientos del laboratorio al mercado, convertidos ya en aplicaciones para el mundo real, exigió enormes esfuerzos en la generación anterior. A menos que resolvamos esta dificultad, nuestro brillante futuro no llegará a concretarse. Seguimos dependiendo, de varias maneras, del éxito de inversiones del ayer.

Las fuentes de financiación y la iniciativa se han visto mermadas en dos puntos cruciales del camino que lleva del laboratorio al punto de venta: en el estadio inicial, cuando se aplican nuevos conceptos a usos prácticos prometedores (pero especulativos); y en la fase final, durante la transición de una técnica a un producto que es preciso ensayar y pulir para su lanzamiento comercial. La ardua labor de trasladar hasta el mercado la investigación básica solían realizarla los laboratorios de grandes corporaciones. Pero estas instituciones han dejado de asumir en gran parte tal papel. Las empresas de capital-riesgo no han aprovechado la ocasión y han optado, en lugar de ello, por proyectos «seguros», notoriamente rezagados con respecto a la producción de los laboratorios de investigación básica.

Tal tendencia ha puesto en aprietos a toda forma de innovación. La tecnología exige inversiones sustanciales para encauzarla hasta el mercado. El retorno de inversión es, a menudo, incierto. Las comunicaciones y las tecnologías ecológicas —dos campos clave— se muestran especialmente vulnerables al plagio, un problema que las leyes de propiedad intelectual a menudo no pueden abordar. La transferencia de I+D al mercado constituye una propuesta de negocio menos atractiva que las inversiones en fases posteriores, en las que los principales problemas y obstáculos han sido superados ya. Desgraciadamente, los atajos para sacar adelante los grandes hallazgos son escasos y distantes entre sí.

La crisis que estamos afrontando supone una oportunidad para construir un sistema de apoyo más abierto y flexible que ayude a recorrer el largo camino entre el laboratorio y el mercado; un sistema que, en definitiva, resulte más robusto y más acorde con las tecnologías de nuestro tiempo. La largueza corporativa de antaño habrá de ser reemplazada por acuerdos entre Gobiernos, universidades y grandes empresas. Para ello se necesitará una nueva cultura de innovación, en la que operen concertadamente numerosos actores de menor rango que den fluidez al caudal de ideas.

IDEAS A LA ESPERA

La ciencia y la I+D estadounidenses constituyen una fuerza dominante en el mundo. El número de documentos citables en publicaciones científicas (artículos, revisiones y actas de congresos escritos por investigadores estadounidenses) aumentó de unos 310.000 en 1996 a unos 470.000 en 2011. Creció mucho más, en términos absolutos, que en cualquier otro país y, a excepción de China, también más deprisa. En ese período, la proporción de artículos publicados que mencionaban colaboradores de EE.UU. y al menos otro país ascendió del 22 al 30 por ciento, hecho que ilustra en parte el progreso del desarrollo internacional conjunto, fruto de mejores comunicaciones y de la compartición de datos. Si bien se trata de cifras importantes, tras ellas existen motivos de preocupación.



Para entenderlo, fijémonos en Siri, la aplicación del iPhone introducida en 2011 con funciones de asistente personal. Su origen se remonta a una iniciativa de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de EE.UU., financiada con 150 millones de dólares durante cinco años. El proyecto, encabezado por SRI International, contaba con 22 miembros, entre ellos, el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y las universidades Carnegie Mellon y Stanford. SRI prosiguió desarrollando la técnica hasta lanzarla como compañía independiente, con respaldo de capital-riesgo. En 2010, cuando Steve Jobs compró esa empresa para Apple, Siri había necesitado 175 millones de dólares y siete años de desarrollo.

Siri representa mucho más que una innovación para teléfonos inteligentes. Los avances en computación necesarios para comprender, procesar y atender peticiones verbales como la localización de la farmacia más cercana podrían resolver pronto cuestiones de mucho más peso. Cabe imaginarse así que una mujer consulte a Siri sobre un bulto que acaba de palparse en un pecho y obtenga una respuesta fiable.

El ejemplo de Siri ilustra cómo lo que parecería un camino despejado desde la I+D hasta el punto de venta se convierte en un proceso largo y tortuoso. Las innovaciones a gran escala en energías limpias y en fármacos suelen exigir decenios de esfuerzos e inversiones de mil millones o más. Muchos de los inventos con posibilidad de inducir cambios sociales permanecen a la espera, rebosantes de promesas pero faltos de sostén. Los fármacos personalizados, adaptados a cada individuo y a sus dolencias, podrían en el futuro aliviar grandes sufrimientos. Mas los enormes costes y el tiempo necesario para desarrollar y ensayar estas formulaciones especializadas, reguladas por una estricta normativa, desalientan las inversiones. Otra técnica en espera son los robots avanzados y diminutos, insertos en el organismo para retirar placa ateromatosa. Los vehículos voladores miniaturizados no tripulados, en la actualidad una curiosidad de laboratorio, podrían desempeñar un importante papel en la predicción meteorológica o la supervisión de la calidad del aire. En vista de los recortes en fondos estatales para investigación, y dado que los laboratorios de las corporaciones se centran en productos de retorno a corto plazo, ¿quién financiará estas innovaciones?

LA HERENCIA DEL PASADO

En la segunda mitad del siglo XX, los laboratorios de las grandes corporaciones hicieron de puente entre la investigación y el mercado. El silicio estirado (*strained silicon*) constituye uno de los últimos y más importantes ejemplos de financiación corporativa, al que hemos de agradecer el extraordinario aumento de rendimiento de los microprocesadores en los quince o veinte últimos años. La técnica consiste en depositar germanio sobre silicio con el fin de ampliar la separación entre los átomos de silicio, lo que eleva el rendimiento del circuito. El silicio estirado empezó como una idea en un laboratorio de la Universidad Cornell a finales de los años ochenta; después captó la atención de investigadores de los Laboratorios AT&T Bell, que buscaban mejores semiconductores para las centrales telefónicas. La compañía aventuró importantes recursos en la técnica, a pesar de que el retorno de inversión no estaba claro. El investigador principal, Gene Fitzgerald, a la sazón en el MIT, fundó Amberwave Technologies para comercializarla. E hicieron falta otros siete años y millones de dólares más antes de que Intel desvelase su procesador Pentium 4 «Prescott», basado en silicio estirado.

Abundan los ejemplos de invenciones que han dado forma a nuestras vidas, pero que jamás hubieran visto la luz del día sin el sostén de los laboratorios de grandes corporaciones. La fracturación hidráulica (*fracking*) se remonta al siglo XIX, pero no se aplicó de forma generalizada hasta que Stanolind Oil, una filial de Standard Oil en Indiana, se hizo con esta técnica en los años cuarenta del siglo XX. Aun así, se han necesitado decenios de desarrollo para poder extraer gas desde reservas antes inaccesibles. El tortuoso itinerario de la impresión en 3D empezó siendo una investigación de Siemens sobre inyección de tinta, en los años cincuenta; transitó por la facultad de medicina de Stanford, por IBM y por MEAD (una gran papelera), para llegar finalmente a Hewlett-Packard y a otros fabricantes de impresoras.

La senda que conecta los descubrimientos con su plasmación práctica y concluye en el éxito comercial es larga, impredecible y exige numerosas iteraciones. No puede esperarse que las

compañías de hoy, orientadas al producto final, soporten los costes de tales aventuras. Pero es esencial que hallemos una forma de lograrlo, porque se está percibiendo ya el abandono de la investigación fundamental por las grandes corporaciones.

PLAZOS MÁS BREVES

Las presiones de un mercado cortoplacista han debilitado las inversiones en las técnicas de energía solar y electrificación del transporte. En cuanto a las TIC (tecnologías de la información y la comunicación), la Academia Nacional de Ciencias estadounidense ha advertido que la investigación federal básica a largo plazo, orientada hacia descubrimientos fundamentales, ha declinado a favor de productos que evolucionan a plazos más breves y cuya principal finalidad es lograr mejoras en productos y servicios ya existentes. La Asociación de Industrias de Telecomunicaciones ha señalado que EE.UU. ya no es líder mundial en «intensidad de I+D» y ha descendido al octavo lugar entre los países de la OCDE. Apunta que, a lo largo de los últimos 35 años, el Gobierno federal de EE.UU. ha sido el principal patrocinador de la investigación fundamental, dado que, salvo algunas excepciones, los laboratorios de I+D de las sociedades anónimas ya no podían permitirse los elevados costes y riesgos de la investigación básica. Los mandatos de dichas sociedades exigían plazos más breves de I+D y retornos más rápidos.

La historia es parecida en Europa y Asia. Las grandes fuentes de financiación corporativa se han agostado o permanecido constantes en esos continentes, a causa, sobre todo, de las mismas presiones cortoplacistas y de la política de austeridad. En EE.UU., al menos, se dispone de algún capital-riesgo para amortiguar el golpe. Europa y Asia no cuentan con tanta suerte.

El ascenso de China e India ha generado una nueva dinámica. Estas naciones podrían revigorizar la investigación, aunque tal vez supongan una amenaza para los países tecnológicamente consolidados. China podría invertir miles de millones de euros de capital controlado por el Estado en el desarrollo de productos emanados de la investigación básica realizada en EE.UU., Europa o Japón, con lo que cosecharía para sí puestos de trabajo y prosperidad económica. Los derechos de patente suelen haber expirado cuando tales invenciones llegan al mercado, por lo que China no infringiría ningún derecho de propiedad intelectual. De hecho, dado que la comercialización de la investigación básica genera, por derecho propio, propiedad intelectual, China podría acabar exigiendo regalías por inventos derivados de investigaciones realizadas en otros países.

La estrategia de India no es más tranquilizadora. Ya ha nacionalizado patentes importantes en beneficio de su industria farmacológica. Queda por ver si ampliará este enfoque más allá del ámbito de la salud.

No obstante, el auge de China e India presenta un aspecto positivo. Dado que estos países contribuyen a un porcentaje cada vez mayor de científicos en el mundo, cabe esperar que generen cada vez más descubrimientos, con beneficio para los consumidores de todas partes.

EL PODER DE MUCHAS MENTES

Para sacar partido del vasto y creciente potencial de ideas novedosas, hacen falta normas nuevas

EN LA PLUVISELVA DE ÁFRICA CENTRAL, un equipo de investigadores y estudiantes de EE.UU., Camerún, Gabón, Reino Unido, Alemania, Francia y Holanda está creando un plan de conservación para la región que tiene en cuenta su desarrollo económico y el cambio climático. En este grupo, financiado por la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense, figuran biólogos, agrónomos y sociólogos. La colaboración entre personas de diferentes disciplinas y países que comparten objetivos y recursos se está volviendo habitual en el ámbito de la ciencia y la ingeniería. En los equipos, la diversidad acelera la innovación, tal vez porque los investigadores de diferente formación observan los mismos problemas bajo distintas lentes, y juntos pueden corregirse unos a otros sesgos ocultos.

A esta creciente unidad y oportunidad subyace, sin embargo, una cierta tensión. Cada país instituye el gasto público en investigación y educación según sus propias prioridades; pero los conocimientos generados por esta inversión no quedan confinados en ninguna frontera nacional. En un mundo sin fronteras, conectado por Internet, ¿cómo asegura un país la sostenibilidad y supervivencia de su motor de innovación? ¿Cómo pueden los países que deben colaborar entre sí acordar los principios comunes de compromiso, las normas de calidad de lo producido y el libre acceso a tal producción? Y ¿quién garantizará que las naciones van a respetar semejantes acuerdos? Tales son las cuestiones más urgentes de política científica de nuestros días. Sin un procedimiento para desarrollar los principios de compromiso, la ciencia global quedará paralizada.

Los expertos que trabajan en equipos internacionales, en especial los recién incorporados en la empresa de investigación global, necesitan normas éticas en la profesión científica y otras pautas claras sobre cómo realizar las investigaciones. Hay que contar con formas de juzgar el mérito de las propuestas y de asegurar que los científicos puedan compartir y archivar los resultados de sus estudios mientras se garantizan la privacidad, la confidencialidad y los derechos de propiedad intelectual. Necesitamos políticas claras y modelos de financiación sostenibles para el acceso abierto a publicaciones y datos, lo que afecta a las universidades, bibliotecas, sociedades profesionales y editoriales.

Los Gobiernos y los organismos de financiación de investigaciones de todo el mundo han empezado a ocuparse de tales cuestiones. En 2012, el Consejo Mundial de Investigación, un grupo integrado por directivos de organismos financiadores de ciencia e ingeniería de unos 50 países, se reunió para crear principios comunes de evaluación de méritos. El grupo está preparando normas conjuntas desde la perspectiva de instituciones que subvencionan estudios científicos; también está explorando formas de implicar en sus debates a los centros de investigación, notoriamente, las grandes universidades del mundo.

Este empeño en crear un marco armonioso en el que colaboren diversos expertos constituye un paso importante hacia la instauración de una cultura global de innovación. Como educadores y como científicos, debemos a los contribuyentes de todo el mundo el máximo de innovación posible procedente de la inversión pública en investigación. El equipo de la pluviselva de África Central precisa de normas para cumplir con eficacia su misión científica y social. Y lo mismo vale para todos los que dependen de la ciencia para beneficiar nuestras comunidades y nuestras vidas.

—Subra Suresh

Subra Suresh, *antiguo director de la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense y presidente fundador del Consejo Mundial de Investigación, es rector de la Universidad Carnegie Mellon.*

SUBSANAR LAS DEFICIENCIAS

En ausencia de los grandes patrocinadores tradicionales, EE.UU., por su parte, debe recalibrar su estrategia para comercializar sus avances. Serán precisos ciertos sacrificios en nuestra prolongada relación amorosa con el mercado libre; deberemos asumir que algunos aspectos del difícil, oneroso e incierto proceso de innovación exigen un fuerte respaldo de los Gobiernos federal, estatales y locales.

El reciente clamor sobre los fracasos de la empresa de energía solar Solyndra y el fabricante de baterías híbridas A123 Systems ha dado mala fama a las inversiones del Gobierno federal en la comercialización de la tecnología, pero esta clase de inversiones debe continuar. Washington necesita diversificar sus apuestas y subvencionar un amplio abanico de entidades, desde laboratorios gubernamentales hasta empresas tecnológicas de financiación privada. Después de todo, Internet se desarrolló a partir de investigaciones emprendidas por el Departamento de Defensa; el sistema de posicionamiento global, GPS, es fruto de la investigación militar, y los trajes ignífugos que hoy usan los bomberos tuvieron su origen en la NASA. En 2010, cuando la Fundación Nacional para la Ciencia celebró su sexagésimo aniversario, enumeró sesenta descubrimientos financiados por sus arcas, entre ellos la resonancia magnética, la fibra óptica, las supercomputadoras y la criptografía.

Pero las subvenciones federales no son más que un paso. Es necesario fomentar asociaciones que conjuguen los recursos públicos de nuestras agencias gubernamentales y principales universidades con inversiones de tiempo y fondos de la industria privada.

Esta metodología híbrida público-privada no resulta nueva, pero hasta ahora se ha visto en su mayor parte relegada a proyectos pequeños, muchos de ellos infrafinanciados. Las oficinas de transferencia tecnológica de las universidades de élite no se encuentran bien integradas en las operaciones principales de la comunidad académica.

No obstante, están aflorando algunos modelos útiles. El programa Investigación para la Fabricación Avanzada (RAMP, por sus siglas en inglés) está sumando fuerzas de las universidades Carnegie Mellon y Lehigh y de compañías de Pensilvania, con el propósito de descubrir nuevas técnicas y acelerar el flujo de conocimientos entre institutos universitarios y la industria privada. El programa financia investigaciones de nueva generación sobre aplicaciones industriales de la impresión en 3D y un proceso de fabricación de biomateriales basados en plasma sanguíneo.

Otros estados están creando también estructuras que incentivan la participación. En el año fiscal de 2012, Ohio asignó 25 millones de dólares a laboratorios público-privados de primera clase que se centraran en materiales avanzados, medicina regenerativa, células de combustible y de almacenamiento energético, o energías alternativas. El estado de Texas estableció en 2005 el Fondo de Tecnología Emergente para dotar de fondos a empresas privadas que se propusieran comercializar investigaciones iniciadas en universidades tejanas o en el Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston.

DINERO PARA LA GRAN MARCHA

Necesitamos más colaboraciones como esas. ¿Cómo incentivar a los actores, públicos y privados, para que se impliquen en ellas? El Consejo Nacional de Innovación e Iniciativa Empresarial, creado por el Departamento de Comercio estadounidense, ha reunido a líderes de la industria, firmas de capital-riesgo y universidades para tratar esta cuestión. El consejo acordó una serie de recomendaciones para estimular la cooperación entre estos grupos. Entre ellas, que las agencias federales alienten oportunidades para investigaciones innovadoras arriesgadas; que la industria y las universidades refuercen sus inversiones estratégicas para desarrollar tecnologías de interés mutuo; y que todos ellos emprendan programas que pongan en contacto a profesores y estudiantes universitarios con posibles socios de la industria, orientadores empresariales y financiadores de estudios piloto.

Las agencias federales podrían ayudar a las universidades a incorporar componentes de innovación en las solicitudes de subvenciones. A las universidades que hicieran uso de su propiedad intelectual en colaboración con la industria se les podría conceder un tratamiento fiscal preferente. Al mismo tiempo, las oficinas de transferencia de tecnología podrían esforzarse en maximizar los beneficios de los descubrimientos para la sociedad, en lugar de priorizar los ingresos para sus universidades.

Debemos también racionalizar nuestros procesos reguladores. En el caso de industrias sumamente reglamentadas pero en rápido desarrollo, como las de energías limpias, las normativas diseñadas para tiempos de datos escasos y lentos de procesar suponen una rémora para los innovadores. La eliminación de cuellos de botella aceleraría el desarrollo y reduciría costes.

Europa y Asia han dado ya pasos para establecer incentivos a la innovación. Francia, China y Japón han adoptado exenciones fiscales que recompensan a las compañías por la suma total de sus actividades de I+D. EE.UU., en cambio, concede exenciones por piezas, método fastidioso que muchas empresas ni se molestan en solicitar. El continuo desarrollo del Área Europea de Investigación, puesta en marcha en 2000 y relanzada en 2007 para concentrar los esfuerzos en un mismo objetivo hacia 2020, ha llevado a un incremento de cooperación e inversiones en I+D entre países europeos. Tal vez EE.UU. pudiera formar para el continente americano una organización de investigación federada.

La idea que inspira a todas las anteriores consiste en cambiar la cultura actual por otra que reconozca el valor de invertir a largo plazo y en crear incentivos sensatos. Si lo hacemos correctamente, habremos construido un ecosistema de innovación que continuará tornando la gran ciencia en tecnología transformadora durante un siglo más.

David J. Kappos *ha sido subsecretario del Departamento de Comercio de EE.UU. y director de la Oficina de Patentes y Marcas de ese país hasta comienzos de este año, que ingresó como socio de la firma jurídica Cravath, Swaine & Moore. Presta servicios en el Consejo de Acción Global sobre el Sistema de Propiedad Intelectual del Foro Económico Mundial.*

PARA SABER MÁS

Funding breakthrough technology: Case summary: Inkjet printing. Jonny Thompson. Cambridge Integrated Knowledge Center, 2009.

Hydraulic fracturing: History of an enduring technology. Carl T. Montgomery y Michael B. Smith en *Journal of Petroleum Technology*, págs. 26-32; diciembre de 2010. **www.spe.org/jpt/print/archives/2010/12/10Hydraulic.pdf**

Inside real innovation: How the right approach can move ideas from R&D to market-And get the economy moving. Gene Fitzgerald, Andreas Wankerl y Carl J. Schramm. World Scientific Publishing, 2010.

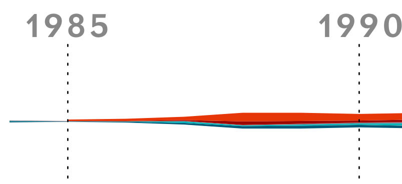
Clasificación, por países, del Foro Económico Mundial sobre disponibilidad de capital-riesgo durante 2011-2012: **www3.weforum.org/docs/FDR/2012/20_Pillar_7_Financial_access_FDR12.pdf**

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

UNA NUEVA VÍA GLOBAL PARA LA INVENCIÓN

La participación creciente de China en patentes internacionales señala la aparición de una nueva forma de I+D

Lee Branstetter, Guangwei Li y Francisco Veloso



LOS PAÍSES no suelen crear tecnología original e innovadora hasta que son francamente prósperos; en concreto, hasta que su producción y renta per cápita se aproximan a la de los países más ricos. China sigue siendo bastante pobre. En 2010, hace solo tres años, su renta per cápita no alcanzaba una décima parte de la estadounidense. Mas, según datos oficiales, las empresas chinas incrementaron su inversión en I+D a razón de un 26,2 por ciento anual entre 1996 y 2010. El número de patentes concedidas a inventores chinos por la Oficina de Patentes y Marcas estadounidense se multiplicó 46,28 veces entre 1996 y 2010. ¿Cómo explicarlo?

Una mirada atenta a estas solicitudes de patentes deja ver que han sido corporaciones multinacionales, no empresas chinas, las titulares de la mayoría de las que se concedieron durante esta explosión reciente. Dicho de otro modo, las compañías chinas siguen rezagadas respecto a sus competidoras multinacionales a la hora de generar inventos que se patenten en los principales mercados extranjeros.

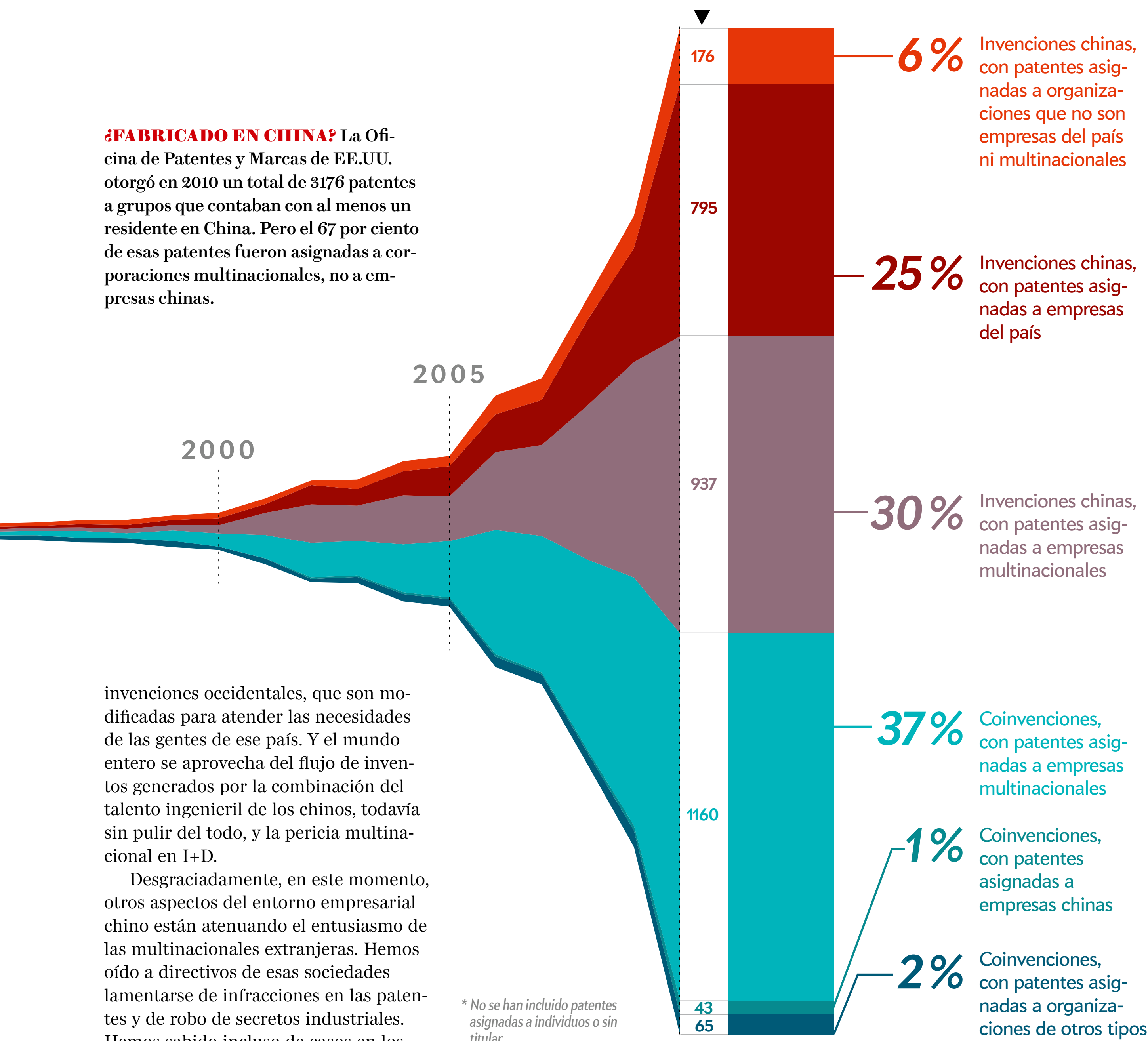
El caso de China contrasta con otras economías asiáticas en auge. Desde que empezaron a consolidarse como importantes nodos de innovación, las empresas japonesas, taiwanesas o surcoreanas poseían y explotaban casi todas las patentes concedidas por EE.UU. a los inventores de esos países. En China no ha sucedido así por varias razones. En primer lugar, el país abrió de forma más amplia sus fronteras a compañías extranjeras y lo hizo al principio de su desarrollo económico, antes que la mayoría de sus vecinos asiáticos. En segundo lugar, su enorme dimensión, y la rapidez de su desarrollo, han motivado a las multinacionales a establecer muy pronto centros de investigación y desarrollo en China, con el fin de asegurarse el éxito en este mercado emergente fundamental. Y en tercer lugar, Internet hizo posible que los ingenieros residentes en China colaborasen con expertos de todo el mundo casi «en tiempo real».

Ese conjunto de circunstancias ha favorecido una interacción intensa entre el personal chino de I+D y sus homólogos de otras regiones avanzadas, más de lo que habría sido posible cuando Taiwán y Corea del Sur se estaban convirtiendo en economías innovadoras.

En nuestra investigación, hemos observado esta colaboración con otros países en los propios documentos de patentes. La mayoría de las generadas en China y concedidas a multinacionales por la oficina estadounidense han sido, en realidad, producidas por equipos internacionales, algunos de cuyos miembros residen fuera de China. Nos referimos a este fenómeno como coinvención internacional, y constituye, asimismo, un rasgo notable en las patentes otorgadas a inventores chinos por la Oficina Europea de Patentes.

La coinvención no se centra únicamente en la adaptación de técnicas existentes para orientarlas al mercado chino. En la actualidad, numerosas multinacionales dedican gran parte de su personal investigador residente en China a la producción de técnicas nuevas destinadas a mercados de todo el mundo. Considerada en conjunto, esta creciente colaboración beneficia a todos los implicados. China logra acceder a

NÚMERO DE PATENTES CONCEDIDAS EN 2010*



¿FABRICADO EN CHINA? La Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU. otorgó en 2010 un total de 3176 patentes a grupos que contaban con al menos un residente en China. Pero el 67 por ciento de esas patentes fueron asignadas a corporaciones multinacionales, no a empresas chinas.

* No se han incluido patentes asignadas a individuos o sin titular.

invenciones occidentales, que son modificadas para atender las necesidades de las gentes de ese país. Y el mundo entero se aprovecha del flujo de inventos generados por la combinación del talento ingenieril de los chinos, todavía sin pulir del todo, y la pericia multinacional en I+D.

Desgraciadamente, en este momento, otros aspectos del entorno empresarial chino están atenuando el entusiasmo de las multinacionales extranjeras. Hemos oído a directivos de esas sociedades lamentarse de infracciones en las patentes y de robo de secretos industriales. Hemos sabido incluso de casos en los que el Gobierno chino, o compañías de propiedad o patrocinio estatal, presionan a multinacionales para que transfieran tecnologías de riesgo a «socios» chinos no afiliados.

A pesar de todo, estamos viendo ya pruebas de que la coinvención internacional aflora no solo en ese país, sino también en India y en Europa Oriental. Ello señala el nacimiento de un fenómeno nuevo en el mundo: una división en las labores de I+D que pone en contacto a los ingenieros mejor preparados de las economías emergentes con la experiencia tecnológica de las multinacionales consolidadas. Lo cual supone una ventaja. De hecho, pudiera resultar esencial para encarar los gigantescos retos tecnológicos que la raza humana ha de afrontar en el siglo XXI.

Lee Branstetter *es profesor de economía y política pública en la Universidad Carnegie Mellon.* ***Guangwei Li*** *es doctorando en el Colegio Heinz, en la Carnegie Mellon.* **Francisco Veloso** *es profesor en el departamento de ingeniería y política pública en Carnegie Mellon, y decano de la Escuela Católica de Ciencias Empresariales y Económicas de Lisboa.*

PARA SABER MÁS

China's embrace of globalization. Lee Branstetter y Nicholas Lardy, julio de 2006. **www.heinz.cmu.edu/research/352full.pdf**

The globalization of R&D: China, India, and the rise of international co-invention. Lee Branstetter, Guangwei Li y Francisco Veloso, agosto de 2013. **http://heinz.cmu.edu/global_research**

PITCH INTERACTIVE (*gráfico*)

ECONOMÍA MUNDIAL

INDICADORES DE INNOVACIÓN

¿En qué medida capitalizan la ciencia los países ya maduros y los emergentes?

Desde 2007, la Universidad Cornell, la escuela internacional de negocios INSEAD y la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) publican cada año el Índice Mundial de Innovación, un informe que evalúa las capacidades y los resultados en innovación de los diferentes países del mundo. El de 2013 comprende 142 economías, las cuales representan el 94,9 por ciento de la población mundial y el 98,7 por ciento del PIB del planeta. A fin de cuantificar algo tan abstracto como «la innovación», los investigadores se valen de 84 cantidades asociadas a cada país, las cuales abarcan desde la estabilidad política o la facilidad para crear una empresa hasta el número de artículos editados en Wikipedia.

A grandes rasgos, los hallazgos de este año pueden resumirse como sigue. En todo el mundo, el gasto en I+D ha vuelto a subir después de las turbulencias provocadas por la crisis financiera internacional. Encabezan la lista los países ricos habituales; en particular, las economías europeas más prósperas. Todos los miembros del grupo de los BRIC (Brasil, Rusia, la India y China) han descendido. El gasto en I+D crece con mayor rapidez en las economías emergentes que en los países más opulentos. Algunas naciones difíciles de prever, como Costa Rica, Uganda o Moldavia, están experimentando enormes progresos a pesar de disponer de unos recursos comparativamente menores.

PARA SABER MÁS

The global innovation index 2013: The local dynamics of innovation. Dirigido por Soumitra Dutta y Bruno Lanvin. Universidad Cornell, INSEAD y OMPI, 2013. **www.globalinnovationindex.org**

The global information technology report 2013: Growth and jobs in a hyperconnected world. Dirigido por Beñat Bilbao-Osorio, Soumitra Dutta y Bruno Lanvin. Foro Económico Mundial e INSEAD, 2013. **reports.weforum.org/global-information-technology-report-2013**

Índice Mundial de Innovación 2013. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. reports.weforum.org/global-information-technology-report-2013

Más con menos
Moldavia, con 3,6 millones de habitantes y un PIB per cápita de 3524 dólares, puede considerarse un país relativamente pobre. Sin embargo, parece aprovechar muy bien sus recursos. Ocupa el segundo puesto de registro de marcas comerciales con relación a su PIB.

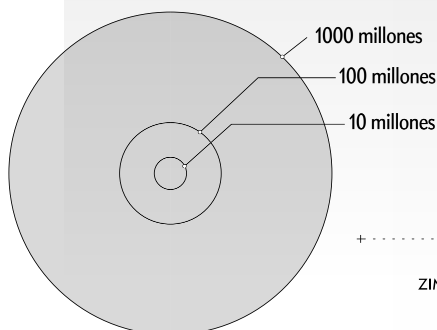
Países de rentas bajas que más han mejorado
Uganda (un país que recibe del exterior una cantidad sorprendentemente alta de financiación para I+D) y Costa Rica (que ocupa el tercer puesto mundial por densidad de nuevas empresas registradas) han sido los países con rentas bajas mejor situados.

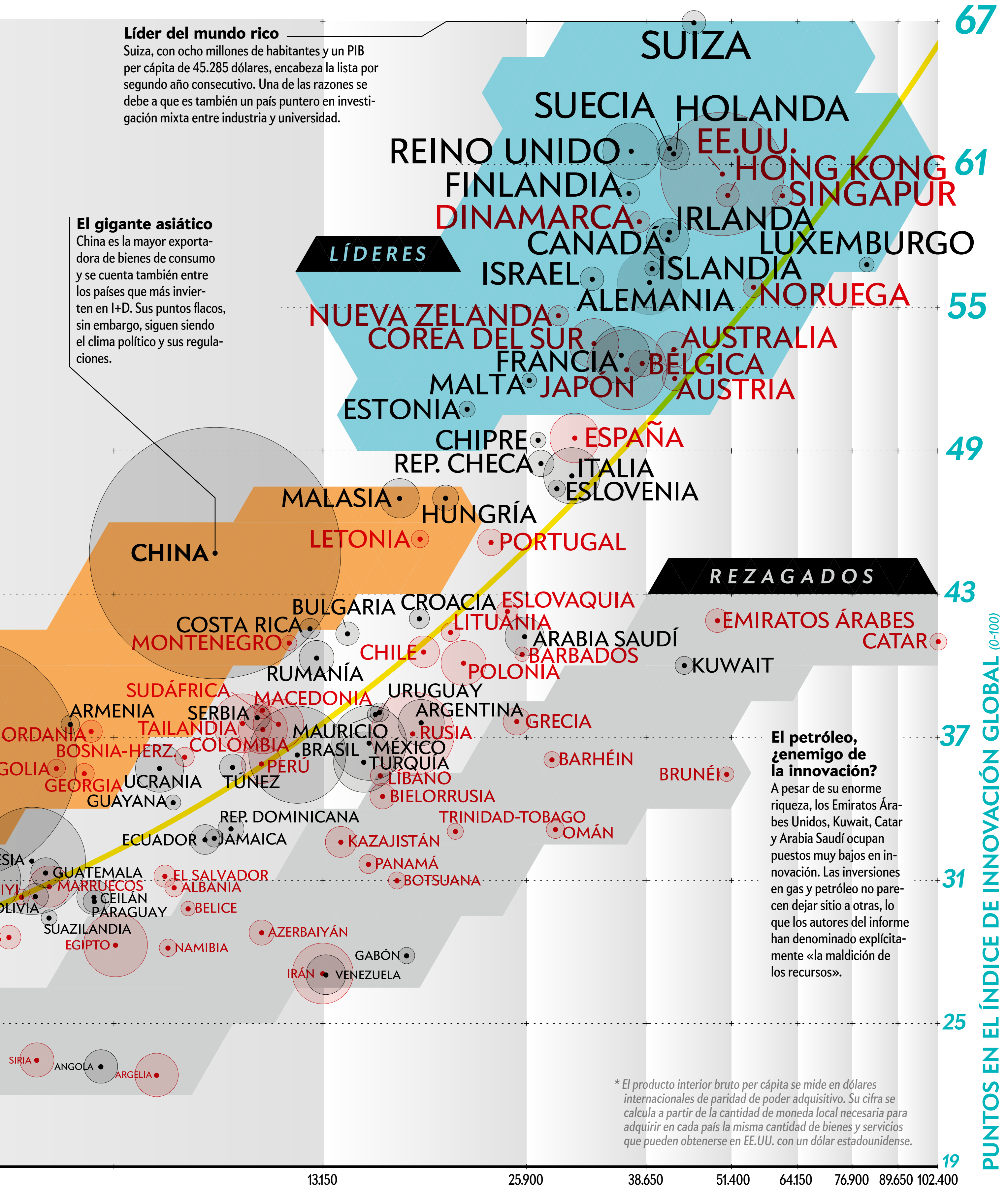
LEYENDA

Los nombres de los países figuran en negro o rojo según su Cociente de Eficiencia Innovadora, un índice que mide la producción innovadora de un país en función de sus recursos.

- INNOVADORES EFICIENTES
  Cociente de eficiencia por encima de la mediana
- INNOVADORES INEFICIENTES
  Cociente de eficiencia por debajo de la mediana

POBLACIÓN





FUENTE: *THE GLOBAL INNOVATION INDEX 2013: THE LOCAL DYNAMICS OF INNOVATION*, DIRIGIDO POR SOUMITRA DUTTA Y BRUNO LANVIN. UNIVERSIDAD CORNELL, INSEAD Y OMPI, 2013; PITCH INTERACTIVE (*gráfico*)



TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

¿POR QUÉ MÉXICO NO RENTABILIZA SU CIENCIA?

El país cuenta con talento de sobra para desarrollar una economía basada en el conocimiento científico y técnico. Sin embargo, algo le impide dar el salto

Erik Vance

EN 2008, parecía que Enrique Reynaud tenía el mundo en el bolsillo. Profesor veterano de biología molecular en la mayor y más importante universidad de México, estaba a punto de comenzar con su primera empresa, Biohominis: un laboratorio que ofrecería valoraciones sobre la predisposición genética del cliente a padecer hipertensión, diabetes y otras enfermedades.

Por varias razones, Biohominis representaba el culmen de la tradición biotecnológica de México. Esta se remonta a Norman Borlaug, quien en los años sesenta del pasado siglo dio el pistoletazo de salida a una revolución verde en Texcoco. En parte, Biohominis se basaba en novedosas aplicaciones de la cadena de reacciones de la polimerasa. La compañía estaba desarrollando técnicas para identificar cánceres, virus y problemas metabólicos en humanos y en el ganado.

Con ese objetivo en mente, Biohominis reunió a un equipo de genetistas de primer orden. María Teresa Tusié Luna, que investiga sobre la genética de la diabetes de tipo 2 (una epidemia cuyo impacto en México solo resulta equiparable al que tiene en EE.UU.), fue nombrada asesora. Isabel Tussié Luna, experta en genética de lesiones cerebrales que cuenta con publicaciones en revistas como *Nature Biotechnology*, ocupó el cargo de directora general de operaciones. Y Eduardo Valencia Rodríguez, fundador de una de las mayores constructoras de instalaciones farmacéuticas del país, se encargaría de la gestión comercial.

También el Gobierno mexicano respaldó la empresa. Durante años, varios altos cargos habían comentado a Reynaud que, para reubicarse como líder tecnológico y dejar de ser un mero proveedor de mano de obra barata, lo que México necesitaba era justamente empresas como Biohominis. El Gobierno

fue más allá de las buenas palabras e incluso aportó unos 500.000 dólares para poner en marcha la empresa.

Nada de eso bastó. Al final, México dio la espalda al proyecto de Reynaud y sus compañeros. Dos años después de echarse a andar, Biohominis se declaró en quiebra y sus miembros se separaron.

¿Cómo pudo una empresa que tenía tanto a su favor acabar de manera tan decepcionante? El caso de Biohominis hace ver cuán difícil resulta instaurar una cultura de la innovación en un país que, desde varios puntos de vista, es la antítesis de la apertura de miras y la meritocracia que caracterizan a Silicon Valley. A pesar de contar con una comunidad científica brillante, México sigue por ahora sin traducir ese talento en nuevos productos, técnicas y empresas locales. No se trata del único país con un nivel medio de ingresos que lucha por escapar de un círculo de explotación laboral y enormes desigualdades sociales. Sin embargo, tal vez más que cualquier otro país emergente, hace ya tiempo que México está preparado para entrar de lleno en la economía de la información. Pero, por algún motivo, se resiste tozudamente a hacerlo.

TALENTO EMPANTANADO

Hace años que la economía mexicana viene desconcertando a los expertos en desarrollo. La Universidad Autónoma de México (UNAM), a la que con frecuencia se atribuye el mérito de haber creado la clase media mexicana, es una de las mayores del hemisferio occidental. Posee más de 300.000 estudiantes y un robusto cuerpo de investigadores. Según datos oficiales, cada año se gradúan en México unos 130.000 ingenieros y técnicos de todo tipo. Fueron científicos mexicanos los que inventaron uno de los primeros televisores a color, quienes contribuyeron de manera decisiva a desarrollar la píldora anticonceptiva y quienes ayudaron a identificar el agujero en la capa de ozono.

Pero, con el paso del tiempo, las instituciones científicas mexicanas parecen haberse quedado de brazos cruzados mientras las de otros países las adelantaban en casi cualquier aspecto medible. Hoy, Argentina y Chile les pisan los talones. Brasil, cuyas universidades ya superan a las mexicanas en las clasificaciones internacionales, invierte en ciencia y tecnología tres veces más que México. Corea del Sur envía a EE.UU. diez veces más estudiantes per cápita que México. Turquía publica casi el doble. Entretanto, una cruenta guerra entre el Gobierno y los narcotraficantes ha hecho trizas el norte del país. La corrupción es rampante y las patentes y las nuevas empresas solo llegan con cuentagotas.

> **Las instituciones científicas mexicanas parecen haberse quedado de brazos cruzados mientras las de otros países las adelantaban en casi cualquier aspecto**

La esquizofrenia de la innovación mexicana —tan dinámica como bloqueada— fue una de las grandes cuestiones durante la campaña electoral de Enrique Peña Nieto, elegido presidente de la república hace ahora un año. Peña Nieto ha prometido un país más tecnológico, uno que cultive una economía basada en la innovación y el conocimiento. Para ello planea comenzar inyectando fondos. Hoy por hoy, México dedica a investigación y desarrollo un mísero 0,4 por ciento de su producto interior bruto.

Pero la disfunción que se observa en el país obedece a causas más profundas que la simple falta de dinero. En México, la innovación se estanca en tres estadios: al principio, cuando un posible invento no es más que una idea; a la mitad, cuando los científicos e ingenieros se disponen a crear una empresa; y al final, cuando todo se desmorona y llega el momento de comenzar de nuevo. Biohominis entró en barrena en las fases intermedias del proyecto, por lo que comenzaremos por ahí.

VARADOS A MEDIO CAMINO

Para cuando Reynaud y sus socios habían gastado el dinero del Gobierno federal, estaban ya logrando ingresos con la venta de algunos productos consolidados. Buscaron entonces inversores privados que les mantuvieran a flote hasta estabilizarse, pero nadie quiso financiarles. La mayoría no entendió lo que Biohominis ofrecía. «Cuando oyen la palabra "tecnología" piensan que estamos en Bangalore haciendo *software*. Les gustan las empresas de informática porque entienden lo que son. Quieren compañías de logística y de transportes por carretera», opina Reynaud. «Y les encantan las compañías de servicios. Si desea financiación de un inversionista mexicano, reúna a gente para lavar suelos. Es la clase de empresa que entienden bien.»

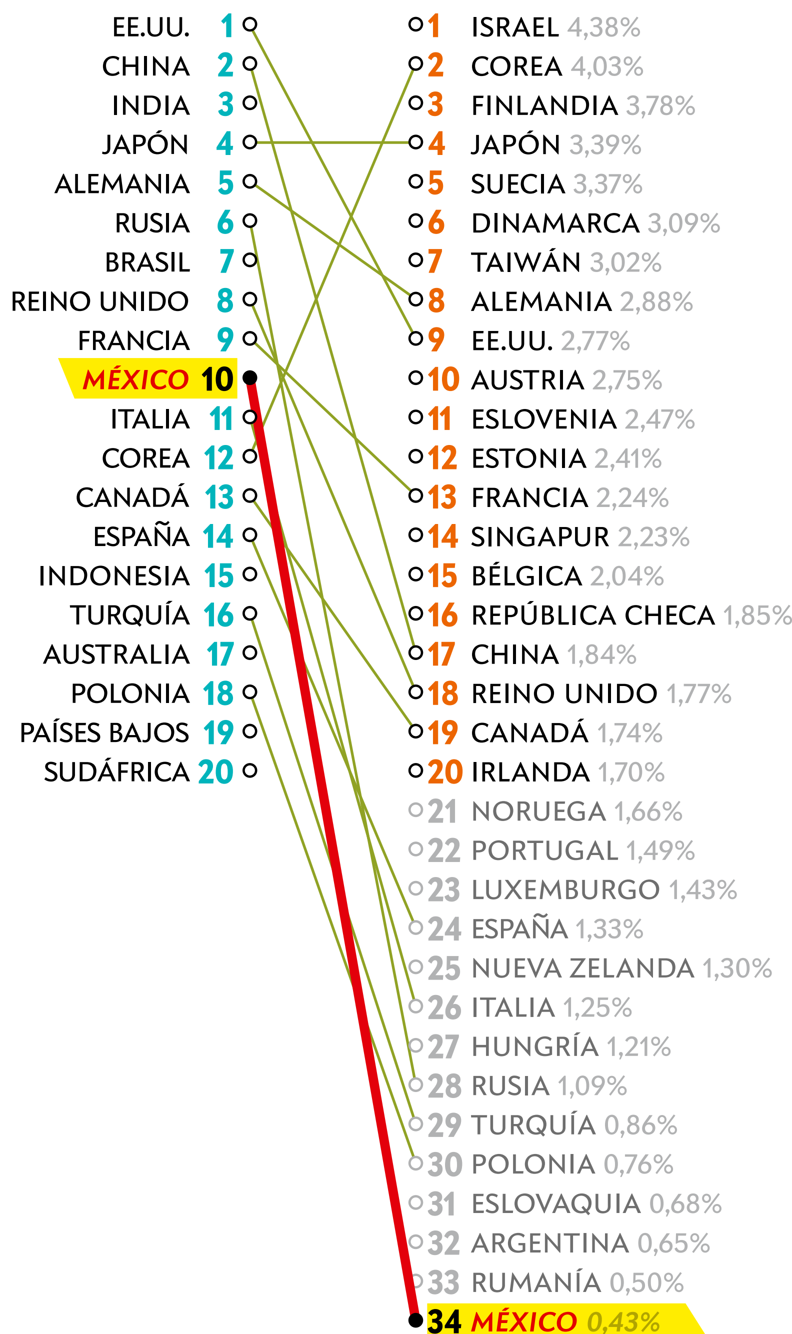
Con un PIB anual de 1,2 millones de dólares, la economía mexicana es la décima del mundo. Durante los últimos años, el país ha crecido al sorprendente ritmo del 3,5 por ciento anual o más. Carlos Slim, el hombre más rico del mundo, es mexicano. Aun así, las pocas compañías que mostraron algún interés en Biohominis exigían un margen de beneficio garantizado del 20 por ciento al año (un precio exorbitante en cualquier mercado, pero mucho más para una empresa que acaba de empezar) o grandes cuotas de participación societaria.

La financiación ofrecida a Reynaud no era del mismo tipo que la que los inversores estadounidenses facilitan a empresas semejantes. En California y otros lugares, la financiación a la innovación es el pegamento que mantiene unidas las ideas y el aceite que hace toda la maquinaria funcione. Las entidades de capital emprendedor conocen bien la ciencia del sector en el que invierten y se dedican a establecer contactos con facultades y laboratorios universitarios. Un aspecto fundamental reside en que apuestan al mismo tiempo por muchas compañías en ciernes, la mayoría de las cuales nunca despegarán. Cuando fracasan, se retiran sin más.

La financiación privada mexicana no funciona de ese modo. En la actualidad, en México existen solo unos 15 fondos de capital emprendedor. Aunque constituye una mejora notable con respecto a las dos entidades de ese tipo que había en 2008, apenas cuatro de ellos pueden considerarse relevantes. En 2011, esas firmas invirtieron un total 468 millones de dólares en 25 proyectos. En EE.UU., solo

MAYORES ECONOMÍAS EN 2013* | PORCENTAJE DEL PIB INVERTIDO EN I+D, 2011†

REZAGADOS: La economía mexicana es la décima mayor del mundo. Durante los últimos años, ha crecido a un ritmo del 3,5 por ciento como mínimo. Sin embargo, el país dedica a investigación y desarrollo un pequeño porcentaje de su PIB, menor incluso que el que invierten otras naciones con grandes dificultades económicas, como España o Italia.



** Según las Estadísticas de Investigación y Desarrollo de la OCDE, las cuales incluyen principalmente los países miembros de dicha organización. Con ciertas cláusulas, la comparación entre las diferentes economías se basa en la paridad de poder adquisitivo en 2005.*

† No se dispone de datos de 2011 para algunas economías.

FUENTE: ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT'S RESEARCH AND DEVELOPMENT STATISTICS DATABASE *http://stats.oecd.org*; PITCH INTERACTIVE *(gráfico)*

en el área de la Bahía de San Francisco se invirtieron 2200 millones de dólares durante el primer trimestre de este año.

Vista la imposibilidad de conseguir capital privado, Reynaud volvió a recurrir al Gobierno, del que obtuvo otro medio millón de dólares. Pero los Gobiernos suelen ser inversores terribles, y el mexicano no constituye ninguna excepción. Emplear el dinero resultó extraordinariamente difícil. Biohominis hubo de hacer frente a sus costes durante casi todo el año (en gran parte, gracias a préstamos personales de Reynaud y los demás propietarios) y solo después recibió el reembolso. Para evitar unos impuestos desmesurados, la compañía disponía de apenas dos meses para gastar el presupuesto de todo el año. Sin embargo, solo estaba autorizada a invertirlo en investigación de laboratorio, no en gastos generales. E incluso así, Biohominis tuvo que adelantar impuestos que le serían devueltos más tarde.

Las grandes compañías, como Nestlé o el gigante de telecomunicaciones Telmex, pueden incorporar subvenciones de ese tipo en sus inflados presupuestos de I+D sin preocuparse demasiado por el calendario de pagos. Pero, para una empresa recién nacida que vive mes a mes, semejantes restricciones resultan letales. Por un lado, Reynaud no podía gastar los fondos disponibles con suficiente rapidez; por otro, se había endeudado cada vez más para cubrir sus gastos de funcionamiento.

A pesar de disponer de ayudas, de unos excelentes conocimientos científicos y técnicos y de unos ingresos que iban en aumento, Biohominis se vio obligada a echar el cierre en diciembre de 2012. Aquel fracaso no fue tanto consecuencia de una mala gestión o de las condiciones del mercado cuanto de un Gobierno muy torpe a la hora de ayudar. La muerte de Biohominis fue lenta y triste, desangrada poco a poco por miles de trámites burocráticos.

«En la UNAM trabajan científicos increíbles, pero no hay nadie que los una ni que tienda puentes. Alguien que comprenda no solo los aspectos técnicos, sino también los empresariales. Ahí reside el carácter único de los capitalistas emprendedores», opina Carlos Santacruz, inversor que ha trabajado en Silicon Valley y en México.

ATASCADOS DESDE EL PRINCIPIO

En cierto modo, Biohominis tuvo suerte. Al menos llegó a contar con el apoyo de algunos inversores y levantó algo parecido a un negocio antes de estrellarse. Otras empresas no llegan tan lejos, pues antes se topan con un impedimento cultural: la desconfianza hacia la tecnología nacional y el complejo de inferioridad con respecto a sus vecinos del norte.

Cuando las compañías mexicanas necesitan investigar o resolver un problema, tienden a buscar las soluciones en empresas estadounidenses o europeas. «Se ha creado el mito de que en México no podemos desarrollar tecnología», sostiene Pilar Aguilar, directora de Endeavor México, la filial mexicana de Endeavor Global, una organización que promueve la innovación en los países en vías de desarrollo. «Hemos visto aparecer técnicas muy innovadoras basadas en procesos químicos o en inteligencia artificial. Pero, a menudo, la primera reacción a la que nos enfrentamos [por parte de las empresas mexicanas] es: "¿De veras estamos haciendo eso en México?". Nos hemos habituado a pensar que la mejor tecnología viene siempre de algún otro sitio.»

De igual modo, los científicos mexicanos tienden a emprender en el extranjero antes que en su país. Así hizo Horacio Montes de Oca, físico formado en México que actualmente reside en Irlanda. Hace unos años, Montes de Oca dio con un nuevo material que, pensó, serviría para la reparación o reconstrucción de tendones y ligamentos (ha rehusado dar más detalles).

Al principio decidió desarrollar la idea con ayuda de un laboratorio universitario del estado de Querétaro. Pero la universidad no tenía ni idea de cómo colaborar con él. No existían procedimientos ni normas para asociarse con un emprendedor externo, y establecerlas llevaría años. Obtuvo la misma respuesta de otras universidades mexicanas. Hijo de investigadores, Montes de Oca poco menos que se encogió de hombros: «Las instituciones universitarias mexicanas no fueron pensadas para replicar el sistema [capitalista]» explica. «Si eres un emprendedor, has de tomar una decisión y decirte: "No va a ocurrir. Quisiera hacerlo en México, pero no puedo esperar cinco años para sacar adelante lo que tengo".»

Al final, Montes de Oca se asoció con un laboratorio británico. Se trata de una historia predecible: uno de los cientos de miles de investigadores mexicanos que viven en el extranjero tiene una gran idea y, en un arrebato sentimental, de patriotismo o de nostalgia, intenta llevarla a su país. Pero, al final, una serie de obstáculos lo reconducen a Estados Unidos o Europa.

«Hemos visto aparecer técnicas muy innovadoras basadas en procesos químicos o en inteligencia artificial. Pero, a menudo, la primera reacción a la que nos enfrentamos [por parte de las empresas mexicanas] es: "¿De veras estamos haciendo eso en México?".»

En la mayor parte de México, la idea de que las universidades deberían ayudar a la industria —ya sea a través de la investigación o fomentando la creación de nuevas compañías— es nueva y no goza de una tremenda popularidad. El salario de un profesor universitario solo depende de su antigüedad y de sus publicaciones, pero no existen incentivos para patentar o emprender. Y, si se logra una patente, la aplicación de la ley es tan laxa que cualquier laboratorio puede aprovecharse y explotar la idea. Como consecuencia, casi toda la investigación que se lleva a cabo en México reviste un carácter sumamente teórico y el Gobierno debe recurrir a otros países para resolver problemas como los causados por la vacuna de la gripe durante el brote epidémico de la cepa H1N1 en 2009.

El geofísico de la UNAM Luis Marín lo comprueba a diario. Hace unos veinte años contribuyó a identificar el Chicxulub (un inmenso cráter muy cercano a la costa de la península de Yucatán) como el lugar de impacto del asteroide que habría acabado con los dinosaurios. En la actualidad publica más de tres artículos al año (ocho veces más que el promedio de su universidad, asegura) y gestiona una empresa de prospección de aguas minerales que contrata con compañías como Coca-Cola. A medida que la compañía ha ido creciendo, sus compañeros le han hecho el vacío.

Tras trabajar durante varios años en la empresa por cuenta propia, intentó llevar el proyecto a la universidad. Pero cada vez que una oficina se hacía cargo de una parte, la mitad del presupuesto se iba en gastos administrativos. De modo que reestructuró la idea y recurrió directamente a la oficina del rector, pero algunos compañeros lo acusaron de jugar sucio contra los departamentos. Después de 23 años en la universidad, recibió el primer informe negativo sobre su trabajo, una evaluación que acarrea consecuencias salariales.

En su acogedor despacho al sur de Ciudad de México, Marín dice no estar seguro de si continuará en la universidad otro año más. Evoca el caso de Harry Steenbock, el científico de la Universidad de Wisconsin que, en 1923, ideó un método para añadir vitamina D a los alimentos por irradiación y contribuyó así a paliar el raquitismo. Patentó la técnica e invirtió los beneficios en más investigación. «Esa es la dirección que tendríamos que tomar. Pero si pretendo dedicar tiempo a tales asuntos, se me castiga. Ni siquiera me dejan en paz: me castigan», lamenta. «Como científico, no existe ninguna ventaja económica clara en patentar algo. Ganas menos y no eres bien visto por tus compañeros.»

AVERSIÓN AL RIESGO

Con todo, tal vez el mayor obstáculo al que se enfrenta México sea la intolerancia al riesgo. En Silicon Valley, el fracaso empresarial se considera uno de los múltiples peldaños que conducen al éxito. «[En México] la gente cree que para invertir en una compañía hay que ser como una de las grandes familias del país, para las que toda inversión da frutos y acaba convirtiéndose en una de las gigantescas empresas de la nación», considera Pablo Slough, director de Google México. «No funciona así. Creo que eso es lo que falta, una especie de término medio y una actitud de apostar.»

La oficina de Google en México puede verse como una pequeña rodaja de la California de las *puntocom*, una extraña anomalía en medio del conservadurismo mexicano. Slough es un orador tranquilo y carismático que viste y actúa como cualquier emprendedor de Silicon Valley. Aunque argentino de nacimiento, invierte de manera regular en empresas mexicanas casi por una cuestión de principio. Explica que, a lo largo de la historia, las grandes compañías del país han estado o bien vinculadas al Gobierno (como la gigantesca petrolera Pemex), o bien fueron antiguos monopolios estatales que, de modo sutil, acabaron metamorfoseándose en monopolios corporativos (como Telmex). Ese mercado tan distorsionado, opina, genera una cultura inversora que, de manera irracional, espera beneficios garantizados.

Hace poco Slough invirtió en una pequeña empresa que fabricaba parques infantiles hinchables para niños. Cuando la compañía quebró, se resignó y pasó a la siguiente inversión. Pero quedó atónito ante las palabras que otros inversores dirigieron a los dos jóvenes que, recién graduados en Stanford, habían puesto en marcha la empresa. «Les reprendieron», cuenta. «El miedo al fracaso importa mucho aquí. En EE.UU., si una compañía se echa a andar y fracasa, ¿a quién le preocupa? Se empieza otra y listo.» Tal vez ello explique que, durante los últimos cinco años, tan solo 17 empresas hayan salido a la Bolsa mexicana mediante una oferta de venta pública de acciones. En comparación, solo durante el primer semestre de este año el parqué neoyorquino ha visto entrar 85 nuevas compañías.

La ausencia o la hostilidad de los inversores, las abrumadoras complejidades burocráticas y una cultura empresarial contraria al riesgo han convertido a México en uno de los países del mundo con mayor fuga de cerebros. La nación envía a EE.UU. más universitarios y estudiantes de doctorado que ninguna otra de América Latina. Pero, una vez que el talento sale al extranjero, puede que ya no regrese. Un estudio ha sugerido que más del 70 por ciento de los doctores mexicanos acaba abandonando el país.

El Gobierno de Peña Nieto parece haber reconocido el problema. Durante la campaña electoral de 2012, sus representantes aseguraron que proyectaban contactar con varias redes de investigadores en el extranjero para tomar nota de los mexicanos residentes en el exterior y, o bien asociarse con ellos, o bien incentivarlos a regresar. Sin embargo, salvo en los laboratorios y universidades más prestigiosos, México no puede competir con los salarios y recursos que los científicos encuentran en EE.UU. «Si pudiera trabajar en un centro de investigación que me permitiera hacer lo que estoy haciendo ahora, lo que hice durante mi doctorado y lo que planeo llevar a cabo en el futuro, me hubiera quedado en México», sostiene Pablo Mendoza, presidente de Mexican Talent Network UK, la asociación de profesionales mexicanos en Reino Unido. «Si tuviéramos la posibilidad de acceder a las mismas oportunidades que vemos en otros países, muchos de nosotros regresaríamos.»

Puede que la diáspora constituya el mayor activo del país. Todos los científicos mexicanos con los que hemos hablado para este reportaje confesaron su esperanza de volver a casa algún día y contribuir así a la ciencia mexicana. Docenas de asociaciones de expatriados similares a la de Mendoza mantienen en contacto a empresarios e investigadores mexicanos, desde Alemania hasta Nueva Zelanda.

BROTES DE ESPERANZA

Fiel a la naturaleza esquizofrénica del país, tampoco falta en él un número cada vez mayor de historias de éxito. Según *The New York Times*, México figuraba en 2012 entre los más grandes exportadores de servicios de tecnología de la información del mundo, justo por detrás de la India, Filipinas y China. Personas como Blanca Treviño, consejera delegada de la multinacional mexicana Softtek, se hallan convencidas de que el país está a punto de entrar en una floreciente economía de la información.

Los principales núcleos de investigación de México, como el centro biotecnológico de Cuernavaca o el de ingeniería automotriz de Toluca, están parcialmente dirigidos por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Aunque no faltan quienes opinan que el Gobierno no puede dictar la innovación, numerosos centros del CONACYT han superado los obstáculos iniciales a los que tuvieron que enfrentarse Reynaud y Montes de Oca. Y aunque parece probable que México vuelva a necesitar a EE.UU. para la próxima vacuna contra la gripe porcina, EE.UU. no tardará en necesitar a México para otros fármacos, como antídotos contra las picaduras de arañas y escorpiones.

El futuro del país dependerá en gran medida del éxito de Peña Nieto a la hora de promover la innovación. El presidente ha querido presentarse como una especie de líder de un nuevo Silicon Valley. Sin embargo, ha devuelto al poder a un partido que gobernó México con mano de hierro durante setenta años y que ha repartido dinero del CONACYT a cambio de favores políticos; la antítesis de los valores de emprendimiento y meritocracia que suelen asociarse a Silicon Valley.

Pero Peña Nieto no lo es todo. Cada vez más, los mexicanos parecen alejarse de un modelo que tiene al Gobierno como referente y comienzan a abrazar nuevas ideas. Reynaud no está dispuesto a darse por vencido: «En los tres años y medio que estuvimos funcionando a pleno rendimiento puede que llegásemos a ingresar un millón y medio de pesos [unos 115.000 dólares]. Estuvimos muy cerca de escapar del Valle de la Muerte», comenta, aludiendo al abismo entre el laboratorio y el mercado.

¿Lo intentaría de nuevo? «Sí. Volvería a hacerlo si tuviera la idea adecuada. He aprendido mucho. La próxima vez será diferente», asegura.

Erik Vance *es escritor científico residente en México D.F.*

PARA SABER MÁS

A special report on Mexico: From darkness, dawn. *The Economist*, 24 de noviembre de 2012. **www.economist.com/news/special-report/21566773-after-years-underachievement-and-rising-violence-mexico-last-beginning**



ENERGÍA

EL NUEVO IMPERIO nuclear ru

La activa política de la Federación Rusa para vender sus reactores en to
inquietudes en Occidente

Eve Conant



COMERCIO EXTERIOR: Los nuevos reactores rusos VVER, en construcción en Novovoronezh, han despertado el interés de numerosos países.

SO

do el mundo despierta

Para cualquier país interesado en adquirir su primer reactor nuclear, la feria internacional ATOMEXPO, en Rusia, ofrece una solución a primera vista sencilla. Hace poco el evento congregó a miles de visitantes de todo el mundo en una gigantesca sala de exposiciones de la época zarista, donde los asistentes pudieron escuchar a firmas como Rolls-Royce hablar de sus generadores de vapor, ver a periodistas de la televisión rusa entrevistar a expertos, o conseguir el calendario *Miss Átomo* con fotografías de las trabajadoras más bellas de la industria nuclear rusa.

Lo más interesante, sin embargo, transcurría en el pabellón de Rosatom, la compañía nuclear nacional rusa. Era allí donde los «recién llegados», tal y como se denominaba a los visitantes procedentes de naciones carentes de centrales nucleares, se informaban sobre las diferentes opciones y firmaban acuerdos de cooperación para que Rosatom construyese e incluso explotase reactores en sus respectivos países. En cierto momento, los fotógrafos retrataron a un grupo de funcionarios nigerianos mientras brindaban con champán con Serguéi Kirienko, director general de Rosatom: celebraban los primeros pasos hacia el ingreso de Nigeria en la creciente lista de clientes de Rusia, a la que ya pertenecen naciones como Turquía y Vietnam. Rosatom ya ha construido reactores en China e India. El pasado julio, tras rechazar las ofertas de Francia y Japón, también Finlandia se decantó por los rusos para su próxima central.

Aquel acontecimiento formaba parte de un proyecto que, con una dotación de 40.000 millones de euros y con el apoyo del Kremlin, pretende convertir a Rusia en un proveedor líder de energía nuclear. El país, que en estos momentos tiene previsto construir unos 40 nuevos reactores dentro de sus fronteras, espera hasta 80 solicitudes del extranjero para 2030; entre ellas, varias instalaciones mixtas de generación de energía y agua desalinizada, de interés especial en Oriente Medio. Esa expansión tiene lugar al mismo tiempo que Alemania abandona la energía nuclear, la industria estadounidense pasa por un bache y Japón se encuentra en pleno examen de conciencia tras el accidente de Fukushima. Vladimir Putin ha calificado todo ese despliegue como «un renacer» de la tecnología nuclear rusa.

Rosatom también tiene puesta la vista en los mercados británico y estadounidense. Es propietaria de varias minas de uranio en Wyoming y, según la Asociación Nuclear Mundial, suministra cerca de la mitad del combustible que usan los reactores de EE.UU. Por ahora, sin embargo, parece más interesada en los países en vías en desarrollo y en aquellos que en el pasado mantuvieron estrechos vínculos con la Unión Soviética. Para algunos de ellos Rosatom ha preparado una gran oferta de «todo en uno»: no solo les suministrará el combustible, sino que se compromete a retirar los residuos a perpetuidad, lo que aliviaría a esos países de la necesidad de construir cementerios nucleares. Ese servicio, que no ofrece ningún otro país, otorga a los rusos una «tremenda ventaja», señala Alan Hanson, quien hace poco comenzó a trabajar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) tras 27 años en Areva, la competidora francesa de Rosatom.

La iniciativa rusa no acaba ahí. El país también otorga becas para que los jóvenes de las naciones interesadas se gradúen como técnicos de centrales nucleares. Y, dado que el precio medio de un reactor supera los 2000 millones de euros, Rusia ofrece el primer programa

EN SÍNTESIS

Rusia se está preparando para vender reactores nucleares no tradicionales a numerosos países en vías de desarrollo carentes de experiencia en energía nuclear.

Los nuevos modelos comprenden reactores generadores de plutonio, minicentrales flotantes y reactores de agua a presión dotados de sistemas de seguridad pasiva.

Algunos expertos occidentales han mostrado su preocupación por la seguridad de algunos de los modelos rusos y ante la posibilidad de que sean empleados con fines militares.

de alquiler de reactores de la historia. Según este, Rosatom construye y explota las instalaciones en suelo extranjero.

Numerosos expertos en todo el mundo muestran su inquietud ante las ambiciones de la Federación. Les preocupa que Rosatom esté dispuesta a hacer negocios sin importar con quién y que ello desemboque en una proliferación descontrolada de material y conocimientos nucleares. Rosatom ha mantenido conversaciones con países que Occidente considera dictaduras, como Myanmar (Birmania) y Bielorrusia. El pasado mes de julio, el presidente de Irán visitó el Kremlin para solicitar de Putin la construcción de nuevos reactores nucleares, además del que Rusia ya construyó en el país persa.

Los responsables rusos rechazan las críticas y se afanan con entusiasmo en ampliar sus redes. En una rueda de prensa de junio de 2012, Kirill Komarov, directivo de Rosatom a cargo de la expansión exterior, afirmaba ante los periodistas: «No hay ningún país en el que no nos interese construir una central».

Existe asimismo la preocupación de que las cuestiones de seguridad no constituyan una verdadera prioridad para los dirigentes rusos. Si bien la protección frente a posibles accidentes ocupa un lugar destacado en el diseño de las nuevas centrales, el Gobierno ruso financia «tanto a quienes las proyectan como a los encargados de las inspecciones independientes», explica Susan Voss, presidenta de la consultora Global Nuclear Network Analysis y antigua científica para el diseño de reactores del Laboratorio Nacional de Los Álamos. «En Japón, esa manera de proceder ha sido aireada como uno de los factores que contribuyeron al accidente de Fukushima», señala.

Serguéi Novikov, portavoz de Rosatom, insiste en que el supervisor federal, Rostechnadzor, es «absolutamente independiente». Rusia asegura que todos los reactores que Rosatom está promocionando incluyen las medidas de seguridad más modernas. Pero, aun así, algunos expertos occidentales albergan dudas sobre el grado de protección que realmente brindan.

REACTORES RÁPIDOS

Rusia es ya el líder mundial en una controvertida opción: el reactor reproductor rápido. Las centrales nucleares tradicionales consumen uranio enriquecido y generan residuos cuya radiactividad, muy elevada, persiste durante miles de años. Los reactores reproductores, en esencia, reciclan el combustible. Los neutrones generados tras quemar el uranio enriquecido se hacen chocar contra un manto de uranio de baja calidad (que no sirve para alimentar el reactor) y lo transforman en plutonio, el cual puede emplearse después como combustible (aunque también generará residuos muy radiactivos). A partir de una misma cantidad de uranio, los reactores reproductores generan entre 10 y 100 veces más energía que las centrales normales de agua a presión o de agua en ebullición.

Estados Unidos estuvo experimentando con reactores reproductores durante los años setenta y ochenta, pero acabó por abandonar la técnica. En parte, porque el uranio era abundante y barato, pero también porque el diseño aumentaba las posibilidades de que proliferasen el plutonio y el uranio aptos para armas nucleares. «Pueden formar parte de un programa de armamento», señala Frank N. von Hippel, físico de la Universidad de Princeton y exdirectivo de seguridad nacional de la Agencia de la Casa Blanca para la Política Científica y Tecnológica. Voss añade que los reactores rápidos proporcionan a un país una fuente «directa» de plutonio adecuado para la fabricación de armas.

Además, un accidente en un reactor reproductor podría resultar muy difícil de manejar. Al contrario que las centrales más tradicionales, aquellos no emplean agua como refrigerante, sino sodio líquido. Esta sustancia se inflama al entrar en contacto con el agua o el aire, lo que impediría a los operarios acceder a las zonas afectadas. Los rusos han tenido que vérselas con varios incendios antes de aprender a controlar la técnica. Además, Von Hippel advierte sobre otra cuestión de seguridad: una fusión del núcleo podría desembocar en una explosión que hiciera saltar la parte superior del reactor, lo que dispersaría materiales radiactivos como plutonio, uranio, cesio y yodo.

Hoy por hoy, el BN-600 ruso, emplazado cerca de Ekaterimburgo, es el único reactor reproductor del mundo que opera con fines comerciales. Sus trabajadores recuerdan con orgullo que ha estado funcionando durante treinta años, diez más de lo previsto.

La empresa OKBM Afrikantov, una filial de Rosatom, ha diseñado los modelos BN-800, ahora en construcción, y BN-1200. Las cifras designan la potencia de la central en megavatios (un reactor de 1000 MW se considera de buen tamaño). Con ligeras modificaciones, el BN-600 puede funcionar con plutonio recuperado de armas nucleares. Un acuerdo de no proliferación entre EE.UU. y Rusia estipula que el BN-800 se empleará para consumir parte de las reservas rusas de plutonio de origen militar. Sin embargo, según Leonid Bolshov, director del Instituto de Seguridad Nuclear de la Academia Rusa de las Ciencias, el BN-1200 fue diseñado para producir combustible de plutonio.

Pese a la inquietud internacional, Rosatom ha diseñado un programa según el cual, para 2050, una fracción considerable de sus recursos se dedicará a la técnica de reactores reproductores. Su objetivo consiste en lograr una industria que, en lugar de almacenar los residuos en impopulares cementerios nucleares, reprocese todo el combustible. «Dispondremos de un ciclo cerrado para el combustible. No hay otro camino», asegura Vladimir Galushkin, el apasionado coordinador internacional de OKBM Afrikantov.

CENTRALES FLOTANTES

La segunda técnica controvertida en la que se ha centrado el país es la del reactor modular pequeño, una versión reducida de los reactores de agua a presión. Los diseños rusos derivan de los antiguos submarinos y rompehielos soviéticos de propulsión nuclear. Resultan mucho más baratos que los gigantescos reactores clásicos y pueden prefabricarse, lo que permite instalarlos en ubicaciones remotas y carentes de normativas de construcción estándar o de trabajadores cualificados. Su inconveniente reside en que apenas generan entre 300 y 500 MW y que, según los críticos, su producción en serie propagaría los riegos aún más. A pesar de todo, el especialista ruso Dmitri Statzura sostiene que la producción en serie constituye «una posibilidad real». El técnico se muestra especialmente entusiasmado con el reactor VVER, un modelo de 500 MW que se construirá en áreas remotas de Kazajistán.

Al mismo tiempo, Rusia está intentando adaptar la técnica del reactor repro-

Eve Conant ha trabajado como corresponsal en Moscú para el semanario *Newsweek*. Hace poco viajó a Rusia con una beca del Centro Pulitzer para el Periodismo de Crisis.



PÁGINAS ANTERIORES: STRIHAVKA JAKUB, AP PHOTO

ductor para emplearla en una minicentral. Este diseño, bautizado como BREST, emplea plomo fundido como refrigerante, el cual reacciona mucho menos que el sodio con el agua o el aire. A pesar de la proverbial toxicidad del plomo, la mayoría de las industrias «saben manejarlo», asegura Kevan Weaver, director de desarrollo tecnológico de TerraPower, una compañía de Washington que desarrolla sus propios reactores rápidos. «Los rusos cuentan con más experiencia que nadie», añade Weaver. Han empleado sus reactores en al menos siete submarinos y han construido dos prototipos en tierra. TerraPower, de hecho, está ensayando sus materiales nucleares en una central de Dimitrovgrad.

La posible proliferación de reactores rápidos pequeños inquieta a grupos como Bellona, una organización ambientalista de Oslo que sigue de cerca los pasos de la industria nuclear rusa. Rusia ha arrestado y encarcelado a algunos informadores de su política nuclear; entre ellos, a un exoficial del Ejército ruso que colaboró con Bellona y que fue acusado de traición. Por su parte, Bellona ha indagado sobre los accidentes sufridos por los submarinos soviéticos y asegura que cuatro de ellos yacen en el fondo del mar con reactores que aún entrañan un peligro.

En cualquier caso, lo que últimamente ha despertado la inquietud de Igor Kudrik, experto en seguridad nuclear de Bellona, son las intenciones rusas de comenzar la fabricación en serie de minirreactores flotantes. La primera central flotante del país, *Akademik Lomonosov*, se encuentra ya en construcción. Se espera que comience a operar en 2016. La idea consiste en disponer de reactores de unos 35 MW, cómodos de manejar y que puedan remolcarse hacia regiones difícilmente accesibles o hacia proyectos que requieran grandes cantidades de energía, como plantas desalinizadoras, a las que abastecería mediante cables lanzados a tierra.

Estados Unidos acarició la misma idea en los años setenta, pero la consideró demasiado peligrosa por el alto riesgo de contaminar las cadenas tróficas marinas. Además, un reactor flotante bien podría constituir el objetivo de una acción terrorista, apunta Sharon Squassoni, experta en proliferación nuclear del Centro de Estudios Estratégicos e Internacionales de Washington. Kudrik añade que en un emplazamiento remoto no se dispondría del personal y los equipos necesarios para hacer frente a un accidente o a la llegada de un tsunami: «No hablamos de un motor diésel», ironiza. A pesar de todo, países como China, Argelia, Indonesia y Namibia, entre otros, han mostrado su interés por el programa.

Bolshov resta importancia a los temores. Asegura que tales centrales se situarían muy cerca del litoral, lo que, desde el punto de vista de la seguridad, no supondría ninguna diferencia con una central costera. Además de impulsar las exportaciones, los reactores flotantes podrían ayudar a Rusia a lograr una posición dominante en la explotación de las reservas petrolíferas del Ártico, a medida que el deshielo provocado por el cambio climático deja más y más zonas accesibles a las perforaciones.

Susciten o no inquietudes, los programas rusos de formación de técnicos nucleares extranjeros resultan vitales para prevenir accidentes

MEJORES OPCIONES

Si bien Rusia está promocionando sus exóticos reactores reproductores y sus minicentrales flotantes, la mayoría de sus esfuerzos se orientan hacia los reactores de agua a presión de última generación, conocidos como VVER. Los reactores que en 1986 se fundieron en Chernóbil también empleaban agua a presión para generar el vapor de las turbinas. Sin embargo, el diseño de los VVER resulta muy distinto y se alojan en un edificio de contención, del cual Chernóbil carecía debido al su gran tamaño.

Los VVER difieren en varios aspectos tanto de los modelos antiguos como de los occidentales. Sus generadores de vapor se disponen en posición horizontal, lo que, según varios expertos occidentales, facilita el acceso para el mantenimiento. Además, las pastillas de combustible exhiben un orificio en el centro. Vladimir Artisyuk, vicedirector de ciencia y asuntos exteriores del Instituto Central de Educación y Formación Continuada de Obninsk, señala que esa geometría las hace más seguras, ya que facilita la refrigeración. Con todo, las grandes mejoras se deben a sistemas de seguridad pasivos, aquellos que permiten detener el reactor sin intervención humana incluso si la planta se queda sin suministro de corriente eléctrica. Entre otros métodos, tales sistemas incluyen grandes tanques de agua para inundar el núcleo sin más impulso que la fuerza de la gravedad, así como la refrigeración por aire. «Solo eso ya habría evitado el accidente de Fukushima», asegura con orgullo el ingeniero jefe Víctor Vágner, desde un emplazamiento cercano a la frontera meridional de Rusia donde se están construyendo dos reactores.

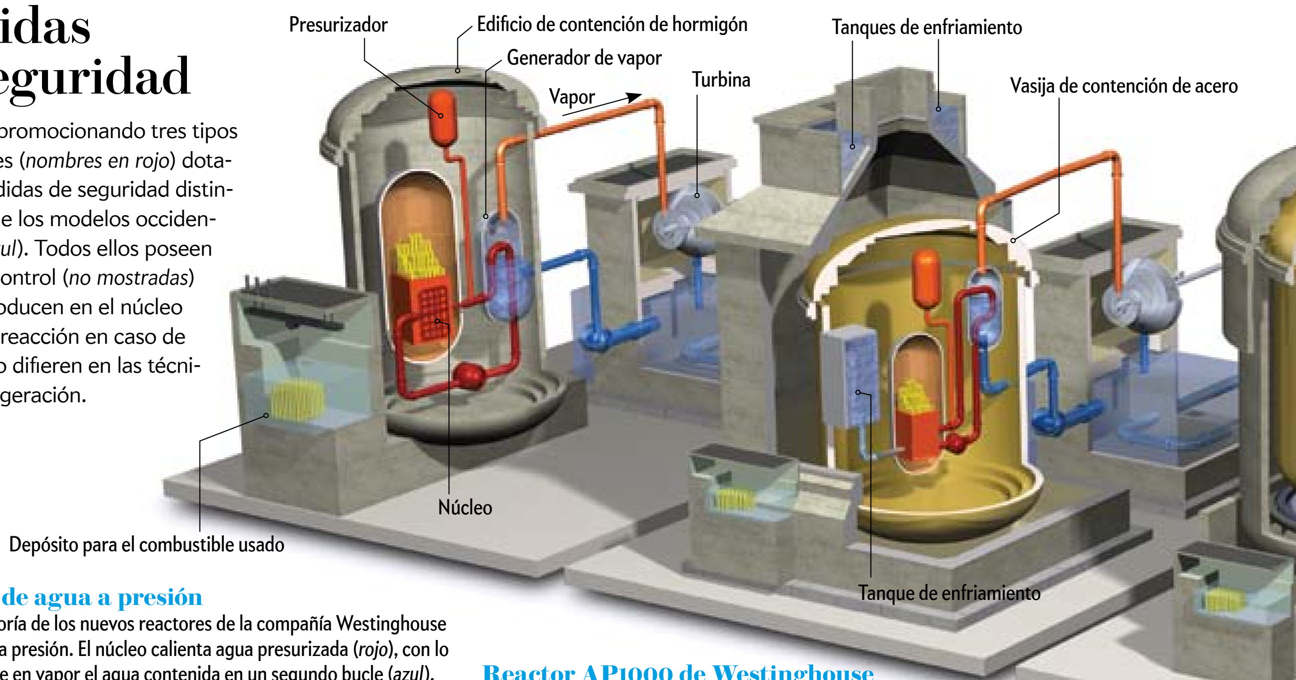
Tales sistemas de seguridad pasiva, que ya se han incorporado a los reactores de Kudankulam, en la India, están convirtiendo a los VVER rusos en una de las opciones preferidas. En estos momentos, Rosatom está construyendo o ha firmado acuerdos para levantar 19 VVER en el extranjero. Los últimos diseños occidentales, como el reactor de agua a presión AP1000 de la compañía Westinghouse, incorporan sistemas parecidos. La mayoría de los expertos entrevistados para este artículo sostienen que, en lo referente a la seguridad, los modelos occidentales y los rusos no muestran diferencias apreciables. Según un consultor estadounidense que asesora a varios países de Europa del Este en la evaluación de las propuestas rusas y que prefiere permanecer en el anonimato: «Los rusos están a la altura de las circunstancias, y es magnífico poder decir esto».

Pero un buen diseño no excluye la posibilidad de una construcción defectuosa. «Aún persisten dudas sobre la calidad de las piezas, la construcción y el servicio de apoyo a largo plazo una vez que el reactor está en marcha», asegura la misma fuente. Bolshov replica que Rosatom cuida al máximo esas cuestiones: «Rosatom ha invertido grandes sumas de dinero para poder competir con los demás fabricantes con la mejor calidad y al mejor precio».

Otra razón por la que los VVER se consideran seguros se debe a un sistema ideado para evitar accidentes como el de Chernóbil. En los días siguientes a la explosión, la Unión Soviética encomendó a Bolshov, entonces físico en activo, el diseño de un método para contener el núcleo fundente del reactor. El investigador ideó una plataforma con tubos serpenteantes refrigerados por agua, revestidos con una capa fina de grafito y emparedados entre dos capas de hormigón de un metro de ancho. «Igual que un bocadillo», explica

Medidas de seguridad

Rusia está promocionando tres tipos de reactores (*nombres en rojo*) dotados de medidas de seguridad distintas de las de los modelos occidentales (en *azul*). Todos ellos poseen barras de control (*no mostradas*) que se introducen en el núcleo y frenan la reacción en caso de avería, pero difieren en las técnicas de refrigeración.



Reactor de agua a presión
La gran mayoría de los nuevos reactores de la compañía Westinghouse son de agua a presión. El núcleo calienta agua presurizada (*rojo*), con lo que convierte en vapor el agua contenida en un segundo bucle (*azul*). Ese vapor acciona una turbina que genera la electricidad. Cuando el reactor sufre una parada de emergencia, el agua a presión enfría el núcleo. Pero, si se interrumpiese el suministro de electricidad, las bombas no funcionarían y el núcleo podría fundirse. Por ello, un suministro extra de energía resulta imprescindible.

Reactor AP1000 de Westinghouse
Este nuevo modelo de agua a presión se halla dotado de un sistema de seguridad pasiva capaz de enfriar el núcleo si se interrumpen todos los suministros de corriente e incluso si ningún operario consigue activar los sistemas de refrigeración. El principal dispositivo de emergencia consta de unos tanques a los que les basta la fuerza de la gravedad para inundar el núcleo con agua durante varios días.

DON FOLEY

Bolshov. Unos heroicos mineros excavaron bajo el humeante reactor e introdujeron la plataforma, a fin de que contuviese el núcleo antes de que se hundiera tanto que alcanzase el nivel freático.

Al final, el sistema de contención de Bolshov no hubo de vérselas con el núcleo, ya que este se solidificó dos metros escasos antes de llegar a la plataforma. Pero aquel gravísimo apuro allanó el camino a los modernos crisoles de seguridad rusos: grandes recipientes cóncavos de acero, hierro y aluminio, refrigerados con agua y construidos bajo todos los nuevos reactores rusos de agua a presión. Tales contenedores ya se encuentran enterrados a 4,5 metros bajo los dos VVER que se están levantando en el sur de Rusia.

Rusia considera vitales los crisoles de seguridad. El modelo de la francesa Areva también incluye uno. Algunos expertos aducen que su instalación no hubiera supuesto grandes diferencias en Fukushima. Sin embargo, es cierto que varios de los núcleos de la central «se desplomaron» sobre el hormigón subyacente, en palabras de Von Hippel. En su opinión, los crisoles de seguridad representan «una buena idea».

No obstante, Hanson y otros expertos alegan que el verdadero objetivo de las medidas de seguridad debería consistir en minimizar los daños hasta el punto de hacer superfluos los crisoles de seguridad. «Ni el público ni el propietario de una central admitirán jamás que un reactor es seguro por el mero hecho de poseer un crisol. Una vez destruido el núcleo, un reactor no es más que un gran desecho; controlar el material fundido no elimina las fugas al exterior», sostiene Hanson. Westinghouse ha hecho suyo este planteamiento. Según Scott Shaw, portavoz de la compañía, el nuevo AP1000 no necesita crisol de seguridad. Si el núcleo empezara a fundirse, un operario podría inundar los alrededores de la vasija durante 72 horas con agua almacenada en tanques.

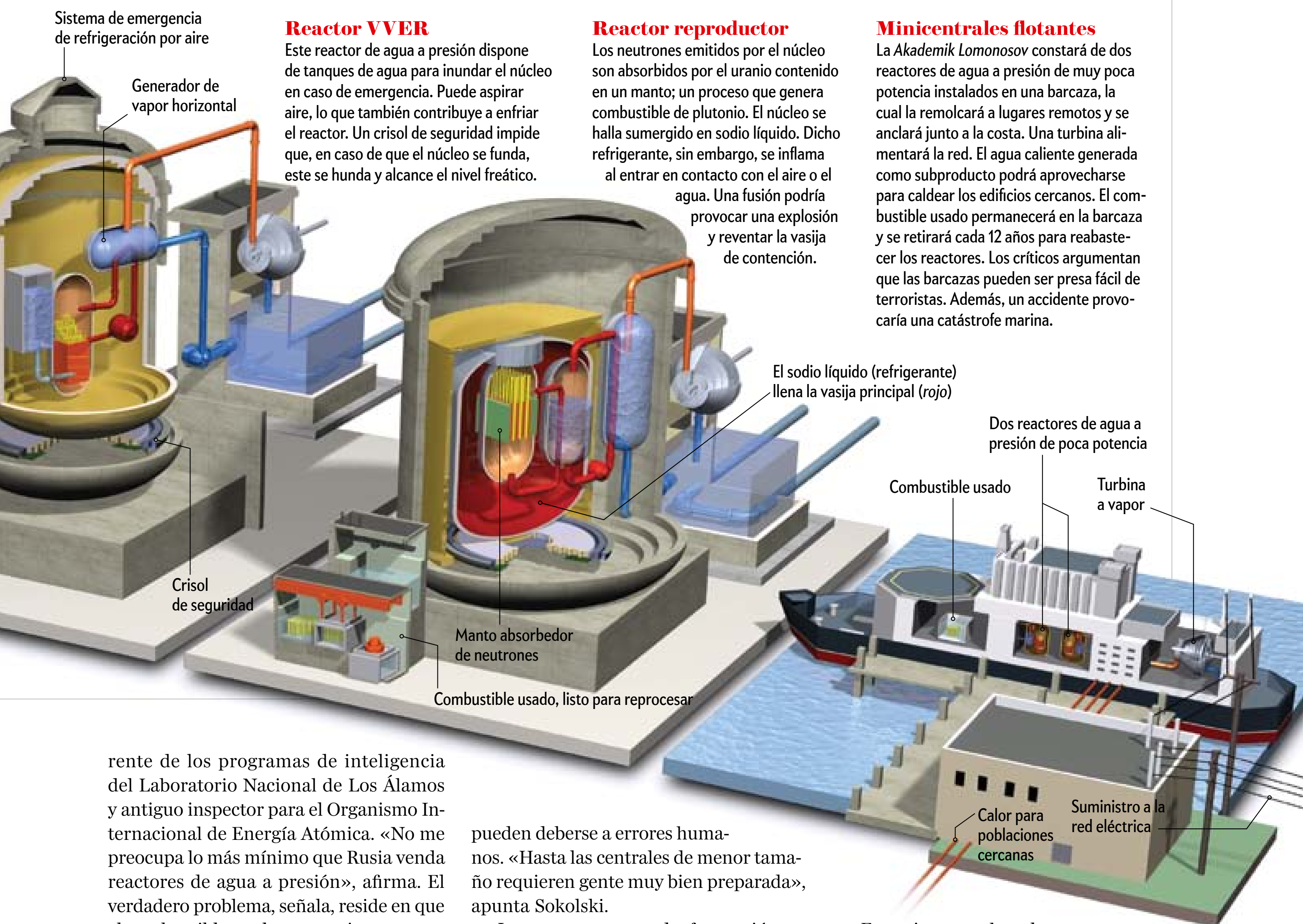
FUGAS DE INQUIETUD

Las centrales VVER de Rosatom llegan con otra novedad; esta vez de carácter económico: la compañía levantará los primeros reactores en Turquía (cuatro VVER-1200) mediante un contrato de construcción, propiedad y explotación, semejante a un alquiler por 60 años. Aunque será la primera vez en la historia que se aplique un acuerdo de este tipo a una central nuclear, Rosatom espera que la iniciativa cuaje: «Reviste un gran atractivo para los recién llegados», apunta Novikov.

Ese plan de arrendamiento inquieta a varios observadores internacionales, en especial cuando se trata de Oriente Medio. Rusia ha terminado un reactor VVER en Irán y ha formado a técnicos iraníes. En Occidente, sin embargo, se teme que el país desarrolle armas clandestinas.

«Resulta difícil no interpretar el interés de Turquía y otros países de la zona como una estrategia para cubrirse las espaldas», sostiene Eric Edelman, antiguo embajador de EE.UU. en Turquía. Aunque en principio un reactor no tenga nada que ver con una bomba atómica, conocer bien la técnica y acceder al ciclo del combustible «incrementaría el riesgo de proliferación en Oriente Medio», apunta Edelman. Henry Sokolski, directivo del Centro de Educación para la Política de No Proliferación de Washington, conviene en que la formación de técnicos nucleares podría acabar sirviendo a fines más perversos. «Da igual en qué medida los equipos sean a prueba de proliferación; los conocimientos no lo estarán nunca», apostilla.

Algunos críticos señalan que los reactores podrían usarse para generar plutonio. «Pero los isótopos de plutonio que pueden producirse en un reactor de agua a presión no pueden aprovecharse para fabricar bombas», Robert Kelley, exge-



rente de los programas de inteligencia del Laboratorio Nacional de Los Álamos y antiguo inspector para el Organismo Internacional de Energía Atómica. «No me preocupa lo más mínimo que Rusia venda reactores de agua a presión», afirma. El verdadero problema, señala, reside en que el combustible nuclear se enriquezca o se reprocese con fines militares.

Por otro lado, con su compromiso de retirar y almacenar permanentemente los residuos nucleares, «Rusia está aportando un elemento muy valioso a los compromisos de no proliferación», opina Von Hippel. «Los rusos son buenos a la hora de atenerse a las regulaciones», añade Hanson, que dirige un programa en el MIT sobre las aspiraciones de los países en vías de desarrollo de acceder a la energía nuclear. En su opinión, mejor sería que las naciones potencialmente conflictivas optasen por ofertas de «todo en uno» similares a la rusa, en lugar de desarrollar por sí mismas sus proyectos nucleares.

LA PRÓXIMA GENERACIÓN

Susciten o no inquietudes, los programas rusos de formación de técnicos nucleares extranjeros resultan vitales para prevenir accidentes, ya que gran parte de ellos pueden deberse a errores humanos. «Hasta las centrales de menor tamaño requieren gente muy bien preparada», apunta Sokolski.

Los cursos rusos de formación se han impartido en la localidad de Obninsk, a dos horas en coche desde Moscú, la cual ha visto crecer el número de aulas y de residencias a fin de albergar el aluvión de estudiantes que se prevé que lleguen durante los próximos años. Muy lejos de casa, los primeros de un total de unos 600 alumnos turcos beben té y contemplan esperanzados un futuro brillante como los primeros técnicos nucleares de su país.

«Gracias a Dios que tenemos Skype», dice Gökçehan Tosun, una joven turca de 21 años, en un café cercano a su residencia. Junto a ella, Olgun Köse practica su inglés tras varios meses de extenuantes clases de ruso. «Hemos llegado a estar a 35 grados bajo cero», relata con los ojos de par en par al recordar su primer invierno ruso. Con todo, la garantía de una carrera y un buen salario los convierten en la envidia de sus amigos.

Esa misma noche, algunos de ellos tocarían en Rockkuyu, una banda de música que debe su nombre a Akkuyu, el proyecto nuclear turco. Köse explica que el petróleo está «acabado», que la energía solar resulta demasiado cara y que la nuclear es una energía verde, «rápida y hermosa». Creen que los nuevos reactores ofrecerán a Turquía la posibilidad de acceder a un futuro sostenible y científicamente avanzado. «Turquía crecerá», asegura Köse.

Y allí estará Rusia, dispuesta a ayudarlos.

PARA SABER MÁS

Tracking nuclear proliferation within a commercial power program. Susan Voss. Nonproliferation Policy Education Center, agosto 2012. Disponible en **bit.ly/144h1HI**
Russia's nuclear renaissance. Eve Conant. Centro Pulitzer para el Periodismo de Crisis. **bit.ly/SmCOEu**
Página web de Rosatom (en inglés): **www.rosatom.ru/en**
Página web sobre Rusia en la Asociación Nuclear Mundial: **bit.ly/1bNtbxH**

ETOLOGÍA

El arte de construir un nido

Los termiteros y hormigueros son proezas arquitectónicas. La modelización informática revela el modo en que los insectos sociales se coordinan para edificar estas estructuras

Guy Theraulaz, Andrea Perna y Pascale Kuntz

TERMITAS DE LA ESPECIE *HOSPITALITERMES HOSPITALES* (Sarawak, Malasia) transportan bolitas de liquen y musgo que les servirán de alimento o de sustrato para cultivar hongos. Como todos los insectos sociales, las termitas cooperan para alimentarse, pero también para construir nidos de una arquitectura asombrosa. Los etólogos estudian los mecanismos de cooperación que dan lugar a estas estructuras.




Guy Theraulaz, director de investigación del CNRS, trabaja en el Centro de Investigaciones de la Cognición Animal en la Universidad Paul Sabatier, en Toulouse.


Andrea Perna es investigador posdoctoral en la Universidad de Uppsala.


Pascale Kuntz, profesora en la Escuela Politécnica de la Universidad de Nantes, trabaja en el Laboratorio de Informática de Nantes-Atlantique.

En 1913, cerca de las orillas del río Sankuru, a algunos kilómetros de Lusambo, en lo que hoy es la República Democrática del Congo, el naturalista Edouard Luja descubrió un nido de termitas con una forma muy extraña. Su estructura no se parecía a ninguna de las conocidas; recordaba más a un objeto de tierra cocida moldeado por algún hábil alfarero que a un nido construido por insectos sociales.

El nido se hallaba en un suelo arenoso de entre 20 y 50 centímetros de profundidad. Su apariencia externa sorprendía por la regularidad y simetría de los detalles estructurales. Ovoide y de unos diez centímetros de altura, su superficie estaba cubierta de pequeños orificios en forma de canalones dispuestos en líneas circulares, distribuidas uniformemente por toda la pared externa. Pero lo más espectacular residía en el interior: una sucesión de cámaras, delimitadas por suelos y techos paralelos espaciados regularmente. Los diferentes pisos se comunicaban mediante rampas helicoidales. Además, el interior de la pared externa estaba atravesado por una serie de galerías circulares. Estas se comunicaban con el interior del nido a través de minúsculas ranuras transversales que se abrían entre los sucesivos pisos, y se hallaban igualmente unidos a los canalones externos por poros minúsculos.

Las termitas que han desarrollado el arte de la construcción con tal refinamiento pertenecen al género *Apicotermes*; viven en el bosque y la sabana africanos. Fueron muy estudiadas en los años cincuenta del siglo xx, sobre todo por el naturalista Jules Desneux, pero hasta hoy nadie había indagado en el misterio de sus habilidades constructoras. ¿Cómo consiguen unos insectos de comportamiento rudimentario edificar semejantes obras maestras? ¿A qué leyes obedece la estructura interna de estos nidos? Tales preguntas constituyeron el núcleo de un proyecto interdisciplinario que empezó a finales de 2006, destinado a entender mejor los mecanismos que intervienen en la construcción de los nidos de tierra en las termitas y las hormigas, así como las características y las propiedades de estas estructuras. Las respuestas dejan entrever el papel esencial que desempeñan los procesos de autoorganización.

Hasta hoy se han descrito unas 2600 especies de termitas y más de 12.500 especies de hormigas. Mientras que las sociedades de hormigas son de tipo matriarcal y suelen estar fundadas por una sola reina, las de las termitas están formadas por individuos machos y hembras y son instauradas por una pareja real. El funcionamiento de tales sociedades se basa en elaborados sistemas de comunicación y en una división del trabajo en el seno de la casta obrera (lo que se manifiesta sobre todo por diferencias morfológicas): algunos individuos defienden la colonia, otros construyen el nido, otros buscan alimento.

TIERRA REGURGITADA

La actividad de construcción está muy extendida en los insectos sociales. Las termitas crean nidos de tamaños y formas variados. Están compuestos por un conjunto complejo de cavidades interconectadas, unidas al mundo exterior por una red de galerías subterráneas o cubiertas. Los nidos se edifican bajo tierra (hipogeos), sobre el suelo (epigeos), en los árboles o dentro de la madera; a veces combinan partes hipogeas y epigeas. Se construyen mediante bolitas de tierra regurgitadas mezcladas

EN SÍNTESIS

Las termitas y las hormigas construyen nidos con una arquitectura asombrosa por su regularidad y simetría.

La modelización informática del nido y de su construcción arroja luz sobre la edificación de dichas estructuras.

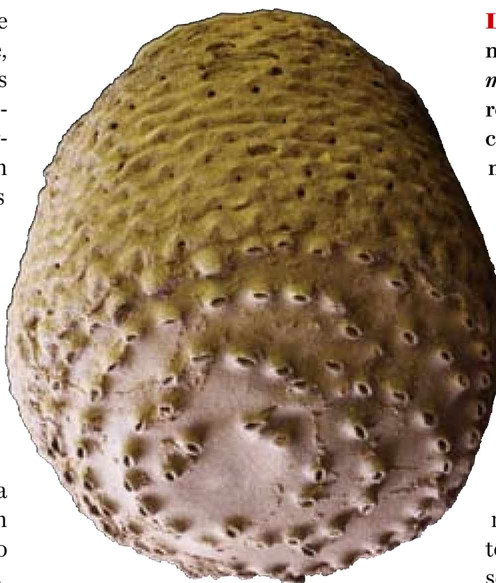
Cada obrero constructor deposita bolitas de tierra en sitios donde estas ya abundan.

La coordinación de las actividades surge de estas acciones individuales por un proceso de autoorganización.

con saliva y excrementos, o bien mediante excrementos únicamente, que, al secarse, forman un cartón sólido. En las hormigas también se dan una gran variedad de nidos, creados a partir de materiales diversos: hojas, briznas, agujas de pino, cartón de madera o bolitas de tierra. Los nidos de las hormigas son arborícolas o subterráneos, o combinan partes hipogeas y epigeas; pero la forma más extendida consiste en una red subterránea de galerías ramificadas que unen entre sí distintas cámaras.

Los nidos sobre los que hemos centrado nuestra atención están constituidos por redes alveolares. El elemento común de todas estas estructuras es la fragmentación del espacio, organizado en una multitud de cámaras tabicadas pero interconectadas por pequeños pasillos. Las cámaras están aisladas entre sí por paredes gruesas, bien dispuestas en pisos regulares, o bien organizadas según una estructura mucho más irregular, de tipo espongiforme.

La principal función de estos nidos es la protección de la colonia contra los depredadores y el mantenimiento de unas condiciones de temperatura y humedad que permitan el desarrollo de la población. Sin embargo, esos recintos confinados presentan ciertas desventajas. Por una parte, es necesario regular los intercambios de gases y asegurar la renovación del oxígeno, lo que precisa una adaptación de las estructuras. Por otra parte, los insectos deben poder circular con eficacia por su interior. En efecto, la complejidad de la red de comunicación entre las cámaras crece a medida que el tamaño del nido aumenta. ¿Cómo se hallan organizadas las vías de comunicación dentro del nido? Ciertas topologías de red favorecerían la circulación de los insectos entre las diferentes zonas. La configuración de las conexiones cumpliría también una función en la protección de las partes vitales del nido al ralentizar el avance de los intrusos. ¿En qué medida la estructura de los nidos satisface los distintos retos funcionales?



LA SUPERFICIE EXTERIOR de los nidos de las termitas del género *Apicotermes* presenta microestructuras espaciadas regularmente que desembocan en pasillos circulares alojados dentro de la corteza del nido. Con una longitud de 10 a 20 centímetros, este se construye a una profundidad de 30 a 60 centímetros en el suelo; se halla envuelto por un espacio vacío o relleno de arena.

Para responder a estas preguntas, desarrollamos varias herramientas con el fin de visualizar y caracterizar la estructura tridimensional de los nidos. Digitalizamos primero todos los nidos que teníamos (120) mediante un tomógrafo de rayos X. Algunos de ellos se habían recogido durante campañas en África y Sudamérica; otros provenían de diferentes colecciones que pertenecían a los Museos de Historia Natural de París y Toulouse. A partir de los datos del tomógrafo reconstruimos la estructura de los nidos en tres dimensiones, lo que nos permitió desplazarnos virtualmente por su interior y tomar varias medidas. Cartografiamos así las redes de conexión entre las cámaras y analizamos su organización espacial y topografía valiéndonos de herramientas de la teoría de grafos. En esta representación, cada cámara corresponde a un nodo de la red y cada una de las galerías que conectan dos cámaras, a un enlace.

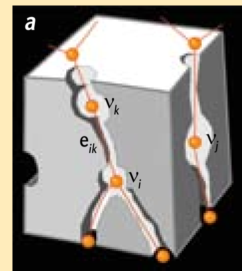


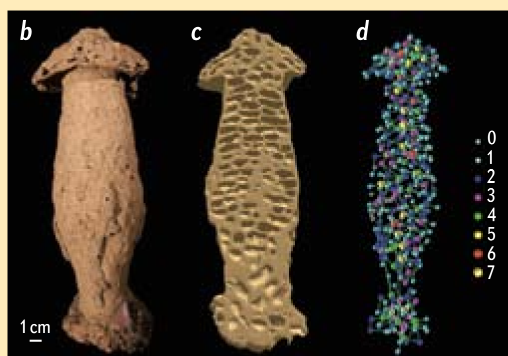


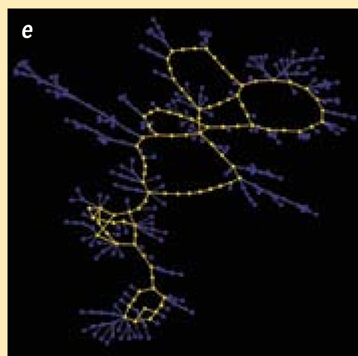
EL INTERIOR DE UN NIDO de termitas *Apicotermes* reconstruido mediante tomografía de rayos X. El grosor de los tabiques horizontales es inferior a un milímetro.

La estructura de las galerías

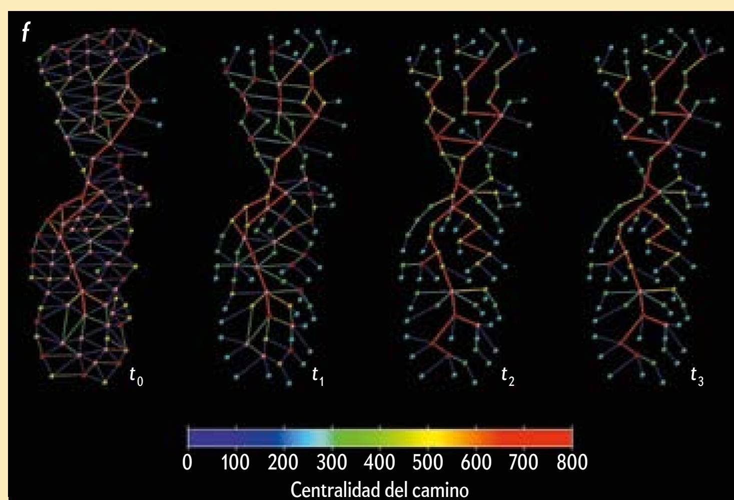
Con la ayuda de la teoría de grafos se estudia la red de comunicación en el nido. Un grafo es un objeto matemático que se compone de nodos y enlaces que describen una relación entre dos nodos. En el caso de un nido, cada nodo v_i representa una cámara, y entre dos nodos v_i y v_j habrá un enlace e_{ij} si existe una galería entre dichas cámaras (*a*).







La representación de la red tridimensional de las conexiones de un nido —aquí de un termitero del género *Cubitermes* (*b*) reconstruido mediante tomografía de rayos X (*c*)— permite visualizar el grado de conectividad de cada cámara y su posición dentro de la red (*d*): el color de cada nodo (cámara) varía según el número de galerías que se unen a él. La representación en dos dimensiones de la red (*e*) muestra que una gran parte de la red (*azul*) puede desconectarse fácilmente del resto de la estructura: basta con obstruir un único nodo o enlace para impedir que un depredador se introduzca por una ruta azul.



Para entender cómo optimizan las termitas sus redes, se estudia la evolución de grafos modelo en función de ciertas restricciones inspiradas en su comportamiento. Aquí, los autores han simulado la evolución de la estructura de una red al eliminar progresivamente los enlaces (galerías) menos importantes para la circulación, sin que se reduzcan las conexiones entre el conjunto de los nodos (cámaras) (*f*). La importancia de un enlace viene dada por su centralidad, es decir, por el número de caminos más cortos entre todos los pares de nodos del gráfico que pasan por el enlace. En las redes que se obtienen con este modelo, las distancias entre los nodos son cortas aunque se hayan eliminado numerosos enlaces, un esquema parecido al que se observa en los termiteros naturales.

En las termitas *Cubitermes*, que estudiamos con Christian Jost, del Centro de Investigaciones de la Cognición Animal en Toulouse, y Sergi Valverde, del Laboratorio de Sistemas Complejos de la Universidad Pompeu Fabra, las redes presentan una conectividad débil. De media, cada cámara solo se halla unida a otras dos y algo más, esto es, cuatro o cinco veces menos que si hubiera estado conectada con todas las cámaras adyacentes. Resulta infrecuente encontrar cámaras con más de tres o cuatro nexos. Además, el conjunto del nido está recorrido por grandes vías de comunicación sobre las que se conectan, de forma arborescente, varios grupos de cámaras. De este modo, cada grupo se halla unido a las grandes vías por un solo túnel.

Esta particular organización de la red podría favorecer la defensa del nido. Si ciertos depredadores (como hormigas) intentan introducirse en él desde una cámara periférica, los soldados solo necesitan bloquear un único túnel (el que comunica el grupo de cámaras con las grandes vías), cuyo diámetro corresponde al de su cabeza, para que la zona invadida quede aislada del resto del nido.

La estructura también permite conectar en poco tiempo diferentes zonas del nido. La longitud media de los desplazamientos necesarios para unir dos cámaras es mucho menor que la que se obtiene en redes con iguales restricciones espaciales pero con todas las cámaras adyacentes interconectadas. Aunque un nido como este presentaría cinco veces más nexos entre cámaras, no se reduciría la longitud media de los caminos entre ellas. Así pues, en algunas especies de termitas la organización a gran escala de la red de comunicación en el nido no resulta en absoluto trivial.

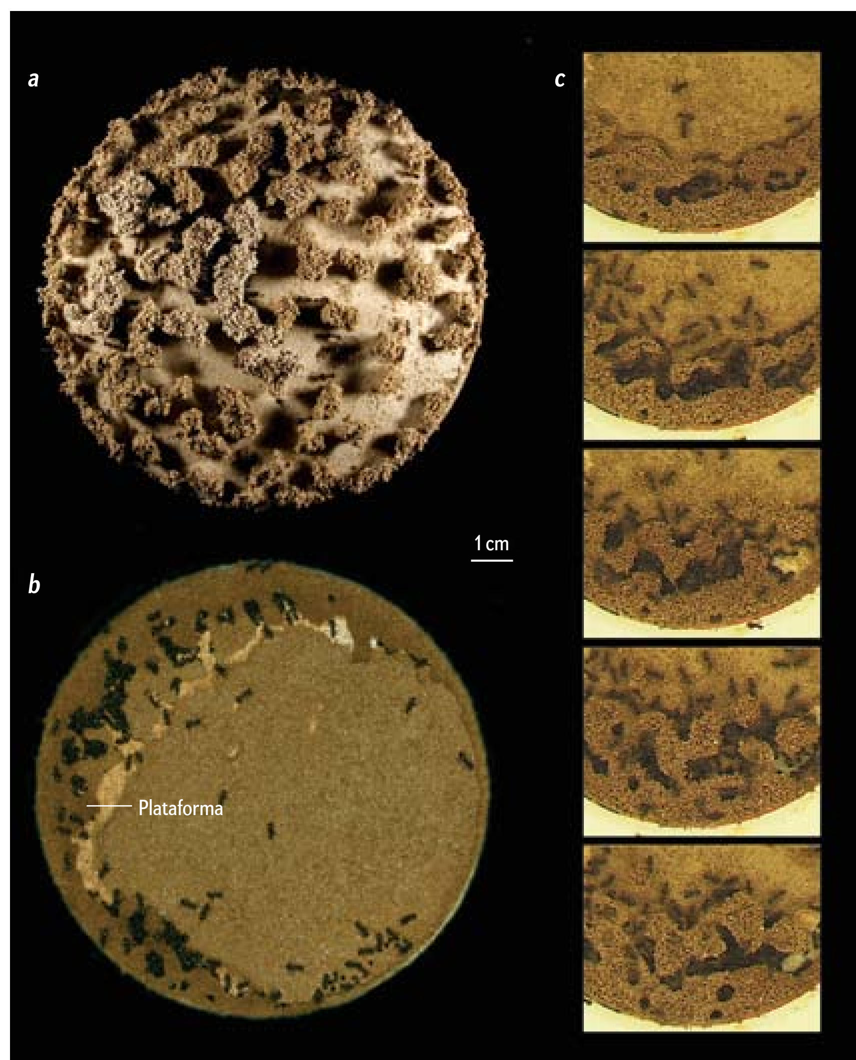
¿Cómo optimizan estos insectos una propiedad global de la red cuando solo gozan de una percepción local del ambiente? El estudio de diferentes modelos de formación de redes de comunicación nos ha llevado a plantear la siguiente hipótesis: la optimización se basaría en la

capacidad de los insectos para estimar otra propiedad de la red: la centralidad de una vía. Representa una medida de la importancia de un enlace para la circulación dentro de una red; su valor corresponde al número total de caminos más cortos entre todos los pares de nodos que pasan por esa vía.

Para evaluar esa propiedad, a los insectos les bastaría utilizar como fuente de información la cantidad de feromona presente en cada una de las ramas de la red por las que se desplazan. Las termitas, como las hormigas, emplean estas señales químicas depositadas sobre el suelo para guiar sus movimientos hacia las zonas de recolección. La feromona empleada por las termitas se acumula pues en las vías de comunicación más concurridas, es decir, en los enlaces «más centrales».

PRIORIZAR LAS VÍAS PRINCIPALES

Nuestro modelo elimina de la red los enlaces menos transitados; solo quedan las vías de comunicación más importantes. Sabíamos que, a lo largo del tiempo, las termitas modifican la estructura de la red de conexión entre cámaras mediante la obturación de determinados conductos. Ese simple mecanismo de conservación de los caminos en función de la intensidad de tráfico permitiría optimizar la red, de manera descentralizada y sin que ningún insecto necesite información global para hacerlo. Las características de las redes obtenidas a partir de la simulación de este mecanismo son muy similares a las de las redes construidas por las termitas.



EN CONDICIONES EXPERIMENTALES, un grupo de 500 hormigas puede construir dos tipos de estructuras: pilares y muros espaciados regularmente (*a*), o grandes plataformas sostenidas por unos pocos pilares (*b*). Las obreras remodelan estas formaciones continuamente al destruir determinadas partes del nido y edificar otras nuevas. En la secuencia superior (*c*), han transcurrido 48 horas entre la primera imagen (*arriba*) y la última.

Para edificar los nidos, las termitas y las hormigas tienen que coordinar sus acciones; si no, les resultaría imposible crear estructuras con formas a veces tan elaboradas. ¿Cómo logran estos insectos tales proezas? Hace poco más de un siglo, en su obra *La vida física de las bestias*, el naturalista Ludwig Büchner describía las hormigas como insectos dotados de facultades próximas a la inteligencia humana, lo que les permitía entrever el objetivo de sus tareas y concebir un plan de ejecución para llevarlas a cabo. Según él, la complejidad de los comportamientos colectivos de las sociedades de insectos tenía su origen en la capacidad de los individuos para centralizar y tratar la información. Estos decidirían las acciones que debían emprender mediante una representación del entorno o analizarían los datos de los problemas a los que se enfrentaban.

Sin embargo, los estudios realizados durante los últimos cincuenta años demuestran que ni termitas ni hormigas poseen una representación o un conocimiento explícito de las estructuras que construyen. Los insectos no utilizan ningún plan predefinido para edificar sus nidos. Cada individuo solo suele tener acceso a una información local sobre lo que sucede en su entorno. El funcionamiento de estas sociedades se basa en una compleja red de interacciones que permite a los insectos comunicarse entre sí y coordinar las actividades. No hay, pues, ningún director de orquesta.

Fue el zoólogo Pierre-Paul Grassé quien, a finales de los años cincuenta, propuso un mecanismo que explicaba cómo coordinan los insectos las actividades de construcción mediante interacciones indirectas. Al estudiar la reconstrucción del nido en las termitas del género *Bellicositermes*, Grassé descubrió que una obrera no controla directamente su actividad, sino que su tarea se inicia y orienta a partir de las estructuras resultantes de su actividad anterior, un mecanismo que él denominó «estigmergía» (del griego *stigma*, orificio, y *ergon*, trabajo). Presente en todos los insectos sociales (termitas, hormigas, avispas, abejas), el mecanismo se basa en las pistas dejadas en el suelo por un individuo mientras se desplaza. Los indicios de feromonas y los esbozos de construcción como consecuencia de su actividad pasada constituyen estímulos que desencadenarán comportamientos

específicos en él y en otros insectos de la colonia.

La labor de los insectos transforma entonces el estímulo que ha motivado su conducta en otro que fomentará nuevas acciones. Cuando el comportamiento contribuye a reforzar la intensidad del estímulo desencadenante, se produce una retroalimentación positiva. Este proceso da lugar a una coordinación de las actividades de los insectos, lo que crea la impresión de que la colonia sigue un plan predefinido.

REMODELACIÓN CONSTANTE

Para comprender la dinámica de la creación de un nido, nos hacía falta, por una parte, identificar los factores que promueven la actividad constructora y, por otra, caracterizar el comportamiento con el que responden los insectos. Tal fue el objetivo que nos propusimos al estudiar la hormiga *Lasius niger*. Esta especie presenta una doble ventaja: es fácil de criar e investigar en el laboratorio, y construye su nido en suelos arcillosos, un tipo de tierra parecida a la de los nidos de otras especies de termitas y hormigas. Nuestra hipótesis planteaba que los mecanismos implicados en la construcción del nido se asemejaban bastante en las termitas y las hormigas, de modo que si estudiábamos *Lasius niger* podríamos deducir algunas generalidades aplicables a otras especies.

Con el objeto de determinar los diferentes procesos involucrados en la creación del nido, caracterizamos los comportamientos individual y colectivo de los insectos, y después relacionamos entre sí ambos fenómenos mediante un modelo matemático. En primer lugar, examinamos la construcción a escala macroscópica y describimos las estructuras espaciales formadas por las hormigas. Con este fin, introdujimos un grupo de 500 hormigas en un dispositivo



DOS TERMITAS de la especie *Cornitermes cumulans* depositan, encima de las paredes de su termitero, bolitas confeccionadas a partir de tierra mezclada con sus propios excrementos.

CONSTRUCCIÓN COORDINADA

Comportamiento individual

Aunque la arquitectura de un nido de hormigas *Lasius niger* esté estructurada, cada obrera constructora solo tiene acceso a informaciones locales. El insecto va recolectando bolitas de tierra continuamente (*a*) para depositarlas en lugares donde estas ya abundan (*b*). Puede detectar estas zonas gracias a feromonas que las hormigas mezclan con las bolitas. Así surgen los pilares (*c*), en los que se forman capiteles a partir de cierta altura (*d*). La coordinación de las actividades emerge a partir de estos comportamientos individuales y de la retroalimentación producida por las estructuras edificadas.



◄ La hormiga extrae bolitas de tierra de entre el material disponible, es decir, de lugares donde otras hormigas las han depositado. Mientras moldea la bolita con saliva, la embebe con feromonas.



▲ Atraída, en su campo de percepción (cinco milímetros alrededor de la cabeza), por las feromonas de las bolitas ya depositadas, la hormiga deja su bolita de tierra en el sitio donde la concentración de hormonas es más elevada.

▼ Los depósitos de bolitas irán creciendo en determinadas zonas, que se convertirán en pilares.

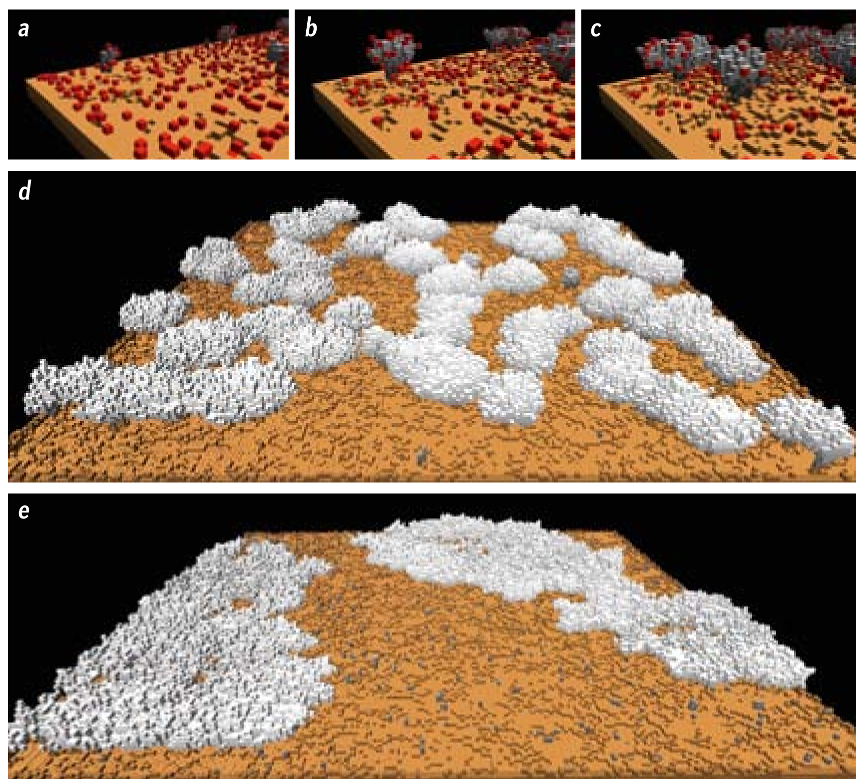




▲ Cuando los pilares alcanzan una altura mínima de 4 milímetros, las hormigas empiezan a amontonar las bolitas lateralmente. Así, poco a poco, se forman capiteles.

compuesto por una placa de Petri que contenía una delgada capa humedecida de arena y arcilla. El dispositivo se hallaba iluminado de forma permanente, lo que estimulaba en gran medida la actividad de las hormigas. Estas edificaron enseguida un refugio para protegerse. Se limitó la cantidad de tierra disponible para poder observar solo las primeras etapas de la construcción. En algunos casos, las hormigas levantaron pilares y muros espaciados con regularidad. En otros, crearon estructuras con aspecto de plataformas que se desarrollaban a partir de los bordes internos de la placa y que descansaban sobre escasos pilares. Por otro lado, estas estructuras no eran fijas: las hormigas las remodelaban continuamente. Así, no era inusual observar una hormiga destruyendo el trabajo que otra había realizado meticulosamente algunos minutos antes.

A continuación estudiamos los comportamientos a escala individual. Con este fin, llevamos a cabo varias series de experimentos para caracterizar con precisión no solo el proceso de recolección y acumulación del material de construcción, sino también su transporte. Como resultado de su actividad, aparecieron dos formas principales de retroalimentación entre las hormigas y las estructuras. En primer lugar, los insectos depositan con preferencia bolitas de tierra en las zonas donde ya se han realizado otras acumulaciones. Esta retroalimentación positiva se desencadena por medio de una feromona que las hormigas añaden al material: el depósito de bolitas en un punto concreto las incita a dejar otras en el mismo lugar; esta tendencia es tanto más fuerte cuanto mayor es la cantidad de tierra amontonada. En cambio, la feromona no ejerce ningún efecto en la recolección: sea cual sea la intensidad del marcaje, las hormigas continúan extrayendo bolitas a un ritmo constante.



EN ESTA SIMULACIÓN de la construcción de un nido, los agentes-hormiga (*cubos rojos*) recogen y depositan bolitas de tierra (*gris*) siguiendo las reglas de comportamiento descritas a partir de las observaciones. Una zona que alcanza una densidad de bolitas lo suficientemente elevada se convierte en un punto de inicio para la construcción de un pilar, gracias a la retroalimentación positiva producida por la feromona que estimula la acumulación de material (*a*). A partir de una determinada altura del pilar, los agentes-hormiga descargan las bolitas en la parte superior de estos; ello pronto aumenta la superficie sobre la cual pueden depositar material nuevo y se originan así capiteles globulares (*b*). Los capiteles próximos entre sí se fusionan y crean un paso abovedado (*c*). La forma de la estructura depende de la duración del efecto de la feromona añadida al material de construcción por los agentes-hormiga: si es larga, pilares y muros se espacian regularmente (*d*); si es corta, se forman grandes plataformas (*e*).

La acumulación de material en el mismo lugar lleva a la formación de un pilar. Cuando los pilares alcanzan una altura de entre cuatro y diez milímetros (la longitud del cuerpo de una hormiga), se pone en marcha una segunda forma de retroalimentación. Las obreras construyen entonces extensiones laterales que dan lugar a «capiteles» de forma globular.

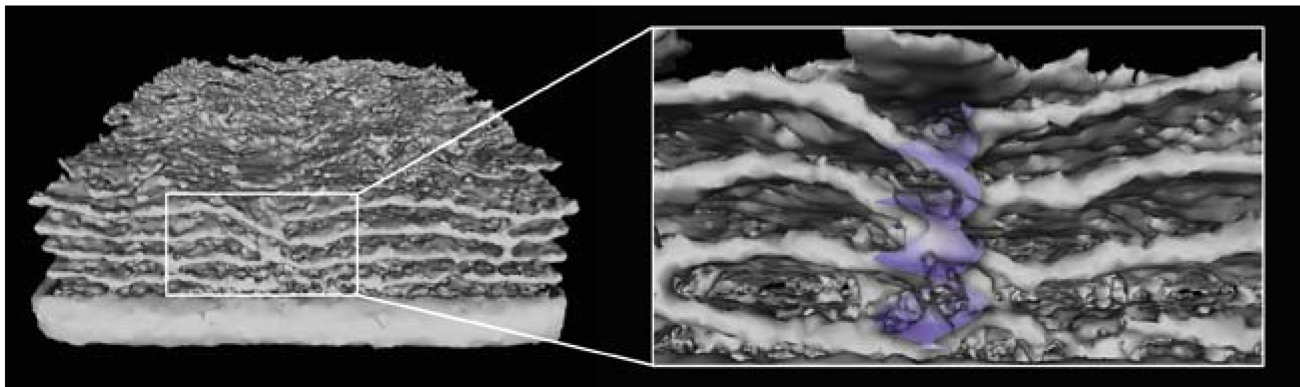
Cabe preguntarse en este punto si son suficientes estas tres acciones (fabricación constante de bolitas, apilamiento allí donde hay más, construcción lateral a partir de una cierta altura) para reproducir de modo experimental las características de las estructuras realizadas por las hormigas. Para relacionar entre sí las dos escalas de conducta observadas, desarrollamos un modelo informático basado en agentes en el que codificamos el conjunto de reglas de comportamiento implicadas en la construcción, así como las características del desplazamiento de las hormigas.

En este modelo, elaborado con Anaïs Khuong y Jacques Gautrais, del Centro de Investigaciones de la Cognición Animal en Toulouse, incluimos las bolitas de tierra utilizadas para crear el nido. A las hormigas las simulamos como agentes cuyo desplazamiento estaba limitado por las estructuras que ellas mismas construían, de modo que permanecían en contacto con la superficie de la estructura. Además, estos agentes solo tenían una percepción local del entorno; sus comportamientos de recolección y acumulación de material fueron calibrados a partir de datos experimentales.

Las simulaciones mostraron una fuerte semejanza entre las formas obtenidas en los experimentos y las producidas por el modelo, para condiciones iniciales parecidas. La evolución del número de pilares erigidos a lo largo del tiempo, así como la distancia media entre dos pilares, se reprodujeron fielmente. Además, el análisis del modelo puso de manifiesto el papel clave de la feromona añadida al material de construcción en la dinámica de crecimiento y en las formas resultantes. Si se aumentaba la velocidad de evaporación de la feromona en el modelo, el número de pilares construidos disminuía, a la vez que se ensanchaban los capiteles de estos.

ARQUITECTURA CON FEROMONAS

Las estructuras obtenidas en la simulación al modificar los parámetros (dura-



ESTRUCTURA DE UN NIDO OBTENIDO POR SIMULACIÓN a partir de un gran volumen inicial de material de construcción. Se originan una serie de plataformas espaciadas regularmente y conectadas a veces por rampas helicoidales (*lila*). Esta configuración se asemeja a la observada en determinados termiteros u hormigueros.

ción del efecto de la feromona, cantidad de tierra disponible) se corresponden bastante bien con las diversas formas observadas en los experimentos: o bien extensas plataformas, o bien un gran número de pilares estrechos espaciados regularmente. En vista de los resultados del modelo, tal variedad de formas tendría su origen en la distinta duración del efecto de la feromona. Pero esta se halla influida por las condiciones de temperatura y humedad. Gracias a este mecanismo, cuando la temperatura aumenta las hormigas construyen refugios con una forma más apropiada para protegerlas, y ello sin que esta adaptación esté codificada en sus reglas de comportamiento. Cuanto más calor hace, más deprisa se evapora la feromona; la competición entre los pilares para atraer a las portadoras de bolitas se vuelve intensa, lo que al final reduce en gran medida el número de pilares que pueden emerger y persistir. Otra consecuencia de la evaporación de la feromona es que encima de los pocos pilares restantes los capiteles construidos aumentan de tamaño y ofrecen en conjunto una mayor cobertura. Por su estructura, el nido así creado constituye un refugio que limita la desecación y conserva un nivel de humedad favorable para las hormigas.

Exploramos con más detalle las propiedades del modelo al estudiar las estructuras obtenidas con un mayor volumen inicial de material de construcción. En estas nuevas condiciones, la fusión progresiva de los capiteles sobre los pilares da lugar a un tabique horizontal. Encima de este se levantan nuevos pilares, que a su vez son ocultados pronto por otro tabique. La construcción prosigue hasta que el material se agota. La estructura resultante está compuesta, por tanto, por una serie de plataformas espaciadas de manera casi regular. Se hallan unidas entre sí por una continuidad entre el suelo de un nivel y el de otro nivel.

RAMPAS ESPIRALES

Al estudiar esas zonas de conexión, constatamos con sorpresa que algunas poseían una forma helicoidal que ya habíamos observado en nidos reales al explorar su reconstrucción tridimensional. ¿Cómo surgía tal forma en la simulación? El análisis de la dinámica de construcción de nuestro modelo reveló que, si bien la configuración global del nido se mantenía idéntica a lo largo del tiempo, la estructura se destruía y restauraba continuamente. Esta remodelación continua se debe a que los agentes-hormiga del modelo destruyen lo que han construido con anterioridad. Al igual que las hormigas reales, extraen material de la superficie superior de los tabiques y lo depositan luego sobre su superficie inferior. Ello implica el desplazamiento progresivo del conjunto de los niveles desde el ápice hasta la base de la estructura.

Constatamos que, a lo largo de las remodelaciones sucesivas, algunos tabiques horizontales nacidos de la fusión de los capiteles entraban en colisión con otros situados en el nivel inferior. En las zonas donde aparecen estos defectos se forman rampas espirales, que unen entre sí los tabiques de dos pisos contiguos. Los resultados demuestran que una gran parte de la complejidad de los nidos construidos por las hormigas, y sin duda también por las termitas, podría resultar de un desfase espacial y temporal en el crecimiento de las diferentes zonas del nido.

Las rampas helicoidales, objetos de fascinación y de misterio desde hace casi un siglo, son generadas hoy en día por nuestro modelo. De lo que se deduce que no están codificadas en el comportamiento de los agentes, sino que son consecuencia de la dinámica de su conducta y de las restricciones físicas que imponen las estructuras a sus desplazamientos. Estos resultados ilustran uno de los rasgos más importantes de los procesos de autoorganización en los insectos sociales: la emergencia, a partir de comportamientos individuales y de interacciones simples, de propiedades nuevas a escala colectiva que beneficiarán a todos los individuos de la colonia.

La autoorganización se basa, por tanto, en una codificación de los mecanismos que, a nivel individual, condicionan la aparición de características globales. Sin embargo, aún quedan numerosas preguntas abiertas: ¿cuáles son los otros procesos implicados en la construcción de los nidos? ¿Cómo influye su estructura en la termorregulación y el intercambio de gases? ¿Cómo se organiza la vida en ellos? Tales cuestiones interesan a los biólogos, pero también a los arquitectos y urbanistas, que en la actualidad se inspiran en los principios de construcción de los insectos sociales para concebir nuevas formas de arquitectura.

PARA SABER MÁS

The structure of gallery networks in the nests of termite *Cubitermes* spp. revealed by X-ray tomography. A. Perna et al. en *Naturwissenschaften*, vol. 95, págs. 877-884, 2008.
Topological efficiency in three-dimensional gallery networks of termite nests. A. Perna et al. en *Physica A*, vol. 387, págs. 6235-6244, 2008.
From local growth to global optimization in insect built networks. A. Perna et al. en *Biologically inspired networking and sensing: Algorithms and architectures*, dirigido por P. Lio y D. Verma, IGI Global, págs. 132-144, 2011.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Redes cristalinas con memoria

La estructura cristalina de ciertas aleaciones puede pasar de una fase a otra sin «olvidar» su geometría macroscópica inicial

Para retorcer cucharas no hay ninguna necesidad de invocar, como hiciera Uri Geller, poderes psíquicos: basta con servirse de aleaciones con memoria de forma. Como su nombre indica, estos materiales pueden «memorizar» una forma predeterminada y recuperarla después de haber sufrido una deformación. Dicha facultad se debe a los cambios que experimenta la estructura cristalina de un material cuando se lo somete a variaciones de temperatura o a esfuerzos mecánicos. Y como veremos, admite numerosas aplicaciones.

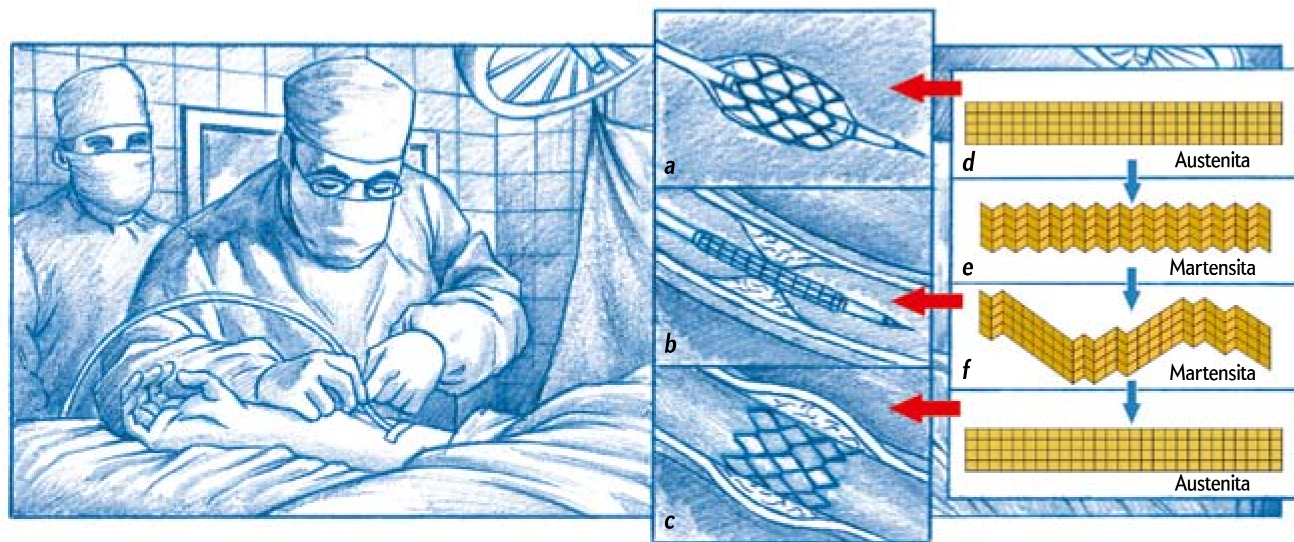
A semejanza del señor Jourdain, el personaje de Molière que hablaba en prosa sin saberlo, todos provocamos a diario transiciones de fase. Así ocurre cuando hervimos agua a 100 grados Celsius o cuando la congelamos. Esas transformaciones constituyen la manifestación visible (macroscópica) de los cambios de organización que tienen lugar a escala molecular.

Existen otros ejemplos de transiciones de fase. Entre ellas, cabe destacar las modificaciones que experimenta la estructura microscópica de un cristal. Recordemos que, en una red cristalina, los átomos se disponen según una celda básica que se repite un gran número de veces en todas las direcciones del espacio. Pero dicha organización puede sufrir transformaciones. El hierro puro, por ejemplo (cuya temperatura de fusión asciende a 1534 ºC), cambia dos veces de estructura cristalina: a 910 ºC y a 1390 ºC. Aunque poco perceptibles a simple vista, esas transformaciones van acompañadas de un cambio brusco en las propiedades físicas del material; en particular, las mecánicas.

De una estructura a otra

Por regla general, en el curso de esas transformaciones los átomos experimentan complejos desplazamientos relativos que los llevan a cambiar de vecinos. Sin embargo, ciertas aleaciones de cobre, zinc o aluminio, y otras de níquel y titanio, como el nitinol, sufren cambios de estructura muy sencillos. En ellos intervienen dos formas cristalinas bien conocidas: la austenita, cuyas celdas básicas son cúbicas y permanecen estables por encima de cierta temperatura, y la martensita, estable a una temperatura menor y con celdas en forma de paralelepípedo oblicuo.

Las celdas de la martensita y la austenita pueden transformarse unas en otras por cizalladura; es decir, al ejercer sobre dos caras enfrentadas fuerzas tangenciales opuestas. A escala microscópica, esa transformación corresponde a pequeños desplazamientos de los átomos que no modifican su entorno más inmediato. En función de la dirección en que se aplique la cizalladura, la geometría de la martensita puede adoptar hasta 24 variantes.



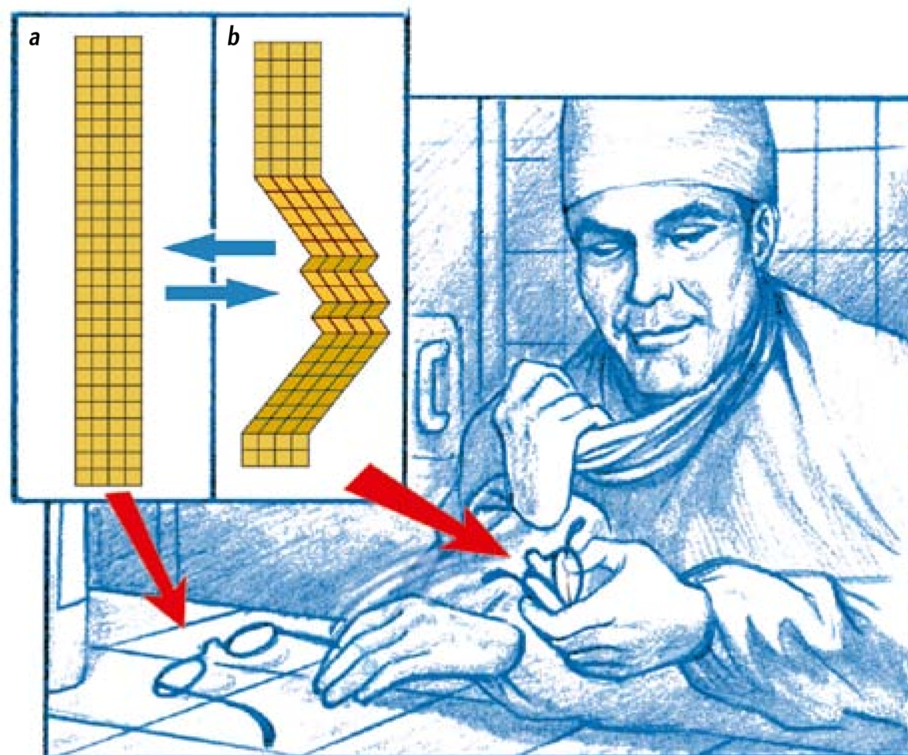
UN *STENT* compuesto de una aleación con memoria de forma recupera su geometría inicial (*a*) tras ser implantado en un vaso sanguíneo obstruido (*b*) y calentarse al entrar en contacto con el cuerpo humano (*c*). Antes de la operación, el dispositivo debe enfriarse, a fin de inducir en el material la transición de la estructura cristalina austenítica (*d*) a la martensítica (*e*). Por último, se aplica una deformación (*f*) para estrecharlo y colocarlo en su lugar (*cada pequeño cuadrado o paralelogramo representa una celda cristalina*).

BRUNO VACARO

¿Cómo pasar de una estructura a otra? O bien ejerciendo una fuerte cizalladura, o bien modificando la temperatura del material. Al calentar el nitinol, la transición entre ambos tipos de estructura cristalina es progresiva y abarca una treintena de grados Celsius en torno a cierta temperatura cuyo valor exacto (por lo general, entre –100 ºC y 150 ºC) depende de la composición precisa de la aleación. A temperaturas intermedias, el material contiene ambas fases en diferentes proporciones.

Imaginemos ahora una barra de nitinol a temperatura elevada; es decir, en su fase austenítica (de celda cúbica). Al enfriarla, la fase martensítica aparecerá a partir de cierta temperatura y su volumen crecerá —a costa del de la austenita— conforme esta vaya disminuyendo.

A escala macroscópica, sin embargo, la barra no se deforma. ¿Por qué? Ello se debe a que se trata de un material policristalino, constituido por una multitud de pequeños monocristales, o granos de cristal perfecto. Así, las orientaciones posibles de la martensita se acomodan a la geometría preexistente: los granos monocristalinos contiguos adoptarán orientaciones opuestas y, a escala microscópica, se organizarán de tal manera que la deformación macroscópica no resulte excesiva.



LA SUPERELASTICIDAD constituye una de las propiedades de ciertas aleaciones con memoria de forma. Resulta particularmente útil en las monturas de gafas: cuando una acción mecánica deforma el material, este pasa de la fase austenítica (*a*) a la martensítica (*b*); al cesar el esfuerzo, retorna a la fase inicial y el objeto recupera su forma.

BRUNO VACARO

Memoria y superelasticidad

Sometamos ahora la barra enfriada de nitinol a una cizalladura macroscópica. Esta solicitación favorecerá la aparición de las distintas variantes de martensita: celdas oblicuas cuyas orientaciones se ajustarán en mayor o menor medida a la dirección de la cizalladura. La fracción del material ocupada por estas variantes aumentará y la barra se deformará a escala macroscópica. Cabe destacar que semejante distorsión no obedece ni a la elasticidad del material ni a una reorganización irreversible de los átomos: se trata de un cambio de geometría de la celda cristalina en sí.

Volvamos ahora a calentar la martensita deformada. Poco a poco, la austenita comenzará a reaparecer. Sin embargo, el carácter único de su celda cristalina (un cubo) no permite demasiadas posibilidades a la hora de recolocar los átomos. Y, dado que estos se han desplazado poco, ¡todo el material recuperará su forma inicial! He aquí el efecto de memoria característico de estas aleaciones.

El nitinol suele usarse en aplicaciones biomédicas en virtud de su magnífica tolerancia por parte del organismo y gracias a que la aleación puede diseñarse para que adopte su fase austenítica a temperatura corporal. Así, las grapas para fracturas óseas o los *stents* (las cánulas que se despliegan en una arteria para evitar su obstrucción) pueden implantarse con facilidad cuando se hallan en fase de martensita. Después, al calentarse en contacto con el cuerpo, adquieren la forma adecuada.

Resulta también posible «educar» estos materiales sometiéndolos a ciclos de enfriamiento y calentamiento bajo esfuerzos mecánicos. En tal caso, no solo memorizarán una forma en fase austenítica (a mayor temperatura), sino también en fase martensítica. De esta manera, al calentarse o enfriarse, pasarán de una a otra. Se sabe que en este proceso intervienen los defectos creados en el material durante los ciclos repetidos; pero, por lo demás, algunos detalles continúan sin conocerse. Con todo, ello no impide aprovechar sus propiedades: el primer robot enviado a Marte disponía de un activador eléctrico con memoria de doble sentido, gracias al cual podía abrir una ventanilla tras la cual se hallaba un panel solar.

También podemos aprovechar el cambio de estructura que tiene lugar a temperaturas elevadas, cuando la austenita es estable. Al someter el material a cizalladuras, se favorece la aparición de martensita. Dado que, para esta estructura, la cizalladura corresponde a su estado natural, la deformación del material puede ser considerable. Como la martensita así creada no ha sido deformada de modo irreversible, la austenita reaparecerá cuando se relaje la solicitación y el material recuperará su forma inicial. Este fenómeno recibe el nombre de superelasticidad.

Tales deformaciones reversibles pueden llegar a ser veinte veces superiores a las que experimenta el acero, lo que equivale a un ocho por ciento en longitud. Gracias a ello, estos materiales pueden aprovecharse en todo tipo de estructuras que deban soportar deformaciones importantes e intempestivas, desde monturas para gafas o las antenas de los primeros teléfonos móviles hasta las varillas de los sujetadores.

PARA SABER MÁS

Science and technology of shape-memory alloys: New developments. K. Otsuka y T. Kakeshita en *Material Research Society Bulletin*, vol. 27, págs. 91-98, 2002.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



El problema de los tanques alemanes

Cuántos taxis hay en Barcelona y cuánta gente correrá la San Silvestre Vallecana

Las matemáticas desempeñaron un papel decisivo durante la Segunda Guerra Mundial. Quizás el caso más conocido, debido a su popularización en la literatura y en el cine, sea la participación de Alan Turing en el centro de criptografía británico de Bletchley Park para descifrar los códigos secretos nazis de las máquinas Enigma. Numerosos expertos consideran que, gracias a ello, la guerra se acortó unos dos años.

Una historia menos conocida tal vez sea que los Aliados usaron una sencilla fórmula estadística para estimar la producción alemana de armamento; en particular, la de sus temidos tanques. Aquel cálculo funcionó muchísimo mejor que las hipótesis de las fuentes de inteligencia, basadas en el recuento de tanques en el campo de batalla y en el espionaje de las fábricas germanas.

Fecha	Estimación estadística	Servicios de inteligencia	Valor real
Junio de 1940	169	1000	122
Junio de 1941	244	1550	271
Agosto de 1942	327	1550	342

Esta tabla, extraída de un artículo de R. Ruggles y H. Brodie de 1947, muestra tres valores reales de producción mensual (conocidos después de la guerra), las estimaciones de los estadísticos y las de los servicios de inteligencia. Mientras que estos últimos concluyeron que, entre junio de 1940 y septiembre de 1942, los alemanes estaban fabricando una media de 1400 tanques al mes, los estadísticos dedujeron que ese número debía ser considerablemente menor: 246. Al finalizar la guerra se tuvo acceso al valor exacto, que resultó ser... ¡245!

¿Cómo lograron los matemáticos acercarse tanto? En 1991, el coronel estadounidense Trevor Dupuy contaba la siguiente anécdota: «Hace pocos años, en Oriente Medio, obtuve permiso del Ejército israelí para visitar su línea de producción de tanques Merkava. En cierto momento pregunté cuántos habían producido, pero se me dijo que se trataba de información clasificada. Me pareció divertido, porque había un número de serie en el chasis de cada tanque». En efecto, los Aliados estimaron el número de tanques alemanes a partir de los números de serie de los vehículos nazis capturados o destruidos.

¡Taxi!

Pero ¿cómo deducir el número total de tanques a partir de una pequeña muestra de números de serie? Pere Grima, profesor de estadística de la Universidad Politécnica de Cataluña, nos propone en su libro *La certeza absoluta y otras ficciones* el siguiente experimento, de corte menos belicista.

En una ciudad como Barcelona, los taxis se encuentran numerados correlativamente por licencias que van de 1 a N. Dicho número figura en la puerta de cada vehículo y puede leerse a distancia con facilidad. Supongamos que deseamos estimar el número total de taxis, N, a partir de una muestra de n licencias observadas en la calle al azar. En jerga estadística, diremos que se trata de estimar el tamaño de una población a partir de una muestra aleatoria sin reposición.

Para tomar valores numéricos concretos, supongamos que el número de taxis es $N = 41$ y que el tamaño de nuestra muestra asciende a $n = 5$ licencias. Imaginemos que, ordenadas de menor a mayor, estas resultan ser 8, 14, 22, 27 y 35.

Si conociéramos la licencia m que ocupa la posición media exacta en la población de taxis, el número total de vehículos sería $N = (m - 1) + 1 + (m - 1) = 2m - 1$. En nuestro ejemplo, con una población de $N = 41$, m vale 21. Y, en efecto, $N = 2 \cdot 21 - 1 = 41$.

Pero en un experimento con taxis reales no podremos saber el valor de m. Sin embargo, parece razonable aproximar dicha cantidad a través de la *mediana muestral*, $\tilde{X}$, el dato de nuestra muestra ordenada que deja tantos valores a su izquierda como a su derecha. En nuestro caso, $\tilde{X} = 22$; es decir, el valor que se encuentra por encima de 8 y 14, y por debajo de 27 y 35. A partir de aquí, podemos construir el siguiente estimador puntual: $\hat{N}_1 = 2\tilde{X} - 1$. En nuestro ejemplo, este arroja una población de $\hat{N}_1 = 2 \cdot 22 - 1 = 43$. ¡Nada mal!

Pero disponemos de otras opciones. Una de ellas consiste en tomar la *media* muestral, $\bar{X}$, en lugar de la mediana. Como siempre, esta se calcula sumando todos los datos disponibles y dividiendo el resultado entre el tamaño de la muestra. En nuestro caso, obtenemos $\bar{X} = (8 + 14 + 22 + 27 + 35)/5 = 21{,}2$. Por tanto, el estimador asociado sería $\hat{N}_2 = 2 \cdot 21{,}2 - 1 = 41{,}4$.

Ambos estimadores parecen muy razonables. Pero ¿puede el lector encontrarles una sencilla pega? Supongamos que nuestras licencias hubieran sido 2, 10, 15, 25 y 40. La mediana y la media muestral serían ahora 15 y 18,4, respectivamente, y las estimaciones correspondientes, $\hat{N}_1 = 29$ y $\hat{N}_2 = 35{,}8$. ¡Ambas menores que 40, uno de los datos de la muestra! Una flagrante contradicción.

Estimadores fiables

¿De qué alternativas disponemos? Denotemos los datos de la muestra ordenados de menor a mayor como $X_1, X_2, ..., X_n$. Por simetría, tal vez podamos suponer que la cantidad de taxis con un número de licencia superior a X_n (el valor más alto de la muestra) es igual a la cantidad de vehículos con una licencia inferior a X_1 (el más bajo). De modo que podemos aventurar que $N - X_n = X_1 - 1$, lo que nos lleva a definir un tercer estimador: $\hat{N}_3 = X_n + X_1 - 1$. Aplicado a los datos de nuestro ejemplo, obtendríamos $\hat{N}_3 = 35 + 8 - 1 = 42$.

Podemos refinar algo más el argumento anterior. ¿Por qué limitarnos a tomar el valor más bajo como referencia? Parece más adecuado suponer que la cantidad de taxis que poseen un número de licencia superior al más elevado de la muestra debería ser igual al promedio de las «distancias» entre nuestras observaciones:

$$N - X_n = \frac{(X_1 - 1) + (X_2 - X_1 - 1) + \cdots + (X_n - X_{n-1} - 1)}{n} = \frac{X_n}{n} - 1.$$

Ello nos permite definir un cuarto estimador: $\hat{N}_4 = X_n + X_n/n - 1$, igual al máximo de la muestra más el hueco medio en la muestra. En nuestro caso, este vale $\hat{N}_4 = 41$.

Observemos que nuestros nuevos estimadores jamás podrán arrojar un resultado menor que ninguno de los datos de la muestra. Dado que $\hat{N}_3 = X_n + X_1 - 1$, el valor mínimo que puede tomar es $\hat{N}_3 = X_n$ (cuando $X_1 = 1$). Y en el caso de $\hat{N}_4 = X_n + X_n/n - 1$, su cota inferior viene dada por el valor más bajo posible de X_n. Dicho valor es n, en cuyo caso obtendremos $\hat{N}_4 = n = X_n$.

Ambos estimadores parecen funcionar bastante bien. ¿Con cuál nos quedamos? Para compararlos, podemos efectuar simulaciones de Monte Carlo, un ejercicio instructivo. Fijamos valores para N y n, y realizamos el siguiente experimento: tomamos una muestra aleatoria sin reposición de n datos de la población N, estimamos la población a través de las dos fórmulas anteriores y calculamos el error asociado a cada una.

Al repetir el experimento un gran número de veces, obtendremos las distribuciones de probabilidad para $\hat{N}_3$ y $\hat{N}_4$, a partir de las cuales podremos calcular sus respectivos valores medios, sus errores medios y sus varianzas. Al final, el mejor estimador será aquel que muestre un error medio y una varianza menores.

Puede demostrarse con facilidad que los valores medios de $\hat{N}_3$ y $\hat{N}_4$ coinciden con N; es decir, que sus errores medios son cero (en términos técnicos, decimos que son estimadores *no sesgados*). Por tanto, para desempatar habremos de recurrir a las varianzas. Estas también pueden calcularse de manera exacta. Al hacerlo, obtenemos:

$$\mathrm{Var}\,(\hat{N}_3) = \frac{2}{n+1}\,\frac{(N-n)(N+1)}{n+2},$$

$$\mathrm{Var}\,(\hat{N}_4) = \frac{1}{n}\,\frac{(N-n)(N+1)}{n+2}.$$

Vemos entonces que $\mathrm{Var}(\hat{N}_3) \geq \mathrm{Var}(\hat{N}_4)$ (observemos que coinciden cuando $n = 1$ y que ambas se hacen cero cuando $n = N$). Así pues, $\hat{N}_4 = X_n + X_n/n - 1$ se perfila como nuestro mejor estimador. Sin ir más lejos, esta fue la fórmula empleada por los Aliados para hacerse una idea de la cantidad de tanques alemanes a partir de sus números de serie.

iPhones y corredores de maratón

La tarea de estimar el tamaño de una población numerada a partir de una muestra sin reemplazo se conoce en el mundo anglosajón como problema de los tanques alemanes. Durante la Segunda Guerra Mundial, dicho método se aplicó a otros pertrechos militares, como los temidos cohetes V2.

En la práctica, sin embargo, el problema puede resultar mucho más complejo. Puede ocurrir que el valor mínimo de los números de serie no sea 1, sino una cantidad desconocida. O que los elementos de la población no cuenten con la misma probabilidad de ser extraídos de la muestra, como seguramente ocurrió con los tanques, cuya posibilidad de ser observados aumentaba a medida que transcurría la contienda.



SAN SILVESTRE VALLECANA del 31 de diciembre de 2005. ¿Sabría estimar el número total de corredores a partir del número de dorsal de una veintena de ellos?

Con todo, la idea básica para llevar a cabo dichas estimaciones es siempre la misma. Hoy en día, las empresas emplean este método para calcular la producción de sus competidores. Hace unos años, a partir de números de serie obtenidos en foros de Internet, los analistas estimaron que el número de iPhones vendidos desde su lanzamiento hasta finales de septiembre de 2008 era de 9,1 millones.

Por cierto: la estimación del número de taxis en Barcelona que hizo Pere Grima a partir de 20 licencias tomadas al azar fue de 10.989. El valor real en aquel momento, consultado en Internet, ascendía a 10.481.

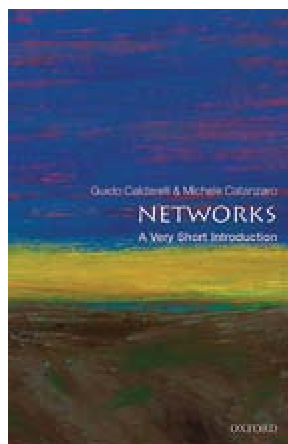
Por mi parte, para no agraviar a los lectores madrileños y como homenaje final a 2013, Año Internacional de la Estadística, me comprometo a estimar el número de corredores que participarán en la San Silvestre Vallecana, la popular maratón que se celebra cada 31 de diciembre en Madrid, a partir de los dorsales de unos cuantos participantes escogidos al azar. Lo suyo sería correrla, pero ya no estoy para esos trotes.

PARA SABER MÁS

An empirical approach to economic intelligence in World War II. R. Ruggles y H. Brodie en *Journal of the American Statistical Association*, vol. 42, págs. 72-91, 1947.

Estimating the size of a population. Roger Johnson en *Teaching Statistics*, vol. 16, n.º 2, págs. 50-52, 1994.

La certeza absoluta y otras ficciones: Los secretos de la estadística. Pere Grima. RBA, colección *El mundo es matemático*, 2010.



NETWORKS. A VERY SHORT INTRODUCTION

Por Guido Caldarelli y Michele Catanzaro. Oxford University Press; Oxford, 2012.

Enredados

El mundo dibujado con redes

Vivimos rodeados e inmersos en redes. Infraestructuras críticas, como las que distribuyen la energía o posibilitan el transporte de mercancías y personas, son redes. Las tecnologías de la información y comunicación como la telefonía, los correos electrónicos, Twitter, Facebook o la propia Internet, se sustentan en redes. Nuestras relaciones sociales, laborales o incluso sexuales pueden describirse como grafos en constante evolución. La biosfera es un conjunto enmarañado de interacciones tróficas, de competencia o mutualismo. Incluso nuestro propio cuerpo es un conjunto de redes acopladas, que van desde el genoma, una red de regulación genética, pasando por la red de interacciones de proteínas, hasta el metabolismo. De hecho, vemos y comprendemos el mundo gracias a las redes, gracias a nuestro sistema nervioso y nuestro cerebro, una maraña donde se conectan 10^{11} neuronas.

Todas estas redes, sus propiedades particulares y comunes, su crecimiento y evolución, y el impacto en las dinámicas que sustentan, han sido motivo de intensa investigación desde que hace quince años, un artículo en *Nature*, «Collective dynamics of "small-world" networks», de Duncan Watts y Steven Strogatz, diera el pistoletazo de salida. Los autores de este libro, Guido Caldarelli y Michele Catanzaro, han sido protagonistas de esta exploración y nos ofrecen en su obra no solo un estado del arte de una nueva disciplina llamada «redes complejas», sino un panorama transdisciplinar mucho más amplio. Por eso el libro comienza cruzando de la mano de Euler los puentes de Königsberg que inauguran la teoría de grafos en el siglo XVIII, continúa con los trabajos pioneros en sociología del psiquiatra Jacob Moreno, al representar la estructura social en forma de red, y sigue con los resultados de los matemáticos Paul Erdös y Alfréd Rényi sobre leyes cero-uno en grafos aleatorios.

El enfoque en redes es más topológico que métrico, interesan más las relaciones que las cantidades, como ocurre con un mapa de metro frente a un mapa geográfico. Los autores ilustran esta perspectiva y conceptos propios de las redes mediante ejemplos como el análisis de la evolución de alianzas en la Primera Guerra Mundial, el lenguaje escrito visto como red o el comercio mundial, donde los países son nodos y las importaciones y exportaciones corresponden a enlaces.

Veamos un ejemplo con más detalle: hace unos años se puso de moda en EE.UU. un entretenimiento llamado el juego de Bacon. El solaz tenía como protagonista central al actor Kevin Bacon. Un participante pensaba el nombre de un actor o actriz cinematográfico. Si dicho sujeto había compartido reparto con Bacon en alguna película, su número de Bacon era 1. Si nunca había participado con Bacon en el mismo filme, pero lo había hecho con alguien que sí, se le asignaba número de Bacon 2 y así sucesivamente. El juego consistía en establecer la cadena más corta, el número de Bacon más bajo posible para el personaje cinematográfico propuesto. Gracias a la base de datos de actores más grande del mundo, Internet Movie Database, compuesta por más de medio millón de nombres y unas 275.000 películas, y al programa Oráculo de Virginia, podemos determinar instantáneamente el número de Bacon de cualquier actor o actriz. Para «Fernando Fernán Gómez», la respuesta del Oráculo es: «Fernando Fernán Gómez actuó en *Soldados de Plomo* (1983) con Assumpta Serna, que actuó en *Chain of Desire* (1992) con Elias Koteas, que a su vez actuó en *Novocaine* (2001) con Kevin Bacon». El número de Bacon de Fernando Fernán Gómez es, por tanto, tres.

Para calcular el número medio de pasos que separan a un actor escogido al azar de Kevin Bacon, basta con computar el número de personas que se encuentra a un paso (1469 actores), a dos pasos (105.800 actores), etcétera, y calcular el promedio: tan solo 2,9. Podemos hacer eso mismo para todos los actores y calcular la media. El resultado: en un grupo de medio millón de personas, unidos profesionalmente pero repartidos por todo el planeta, la «distancia media» entre cualesquiera es de tan solo 3,65 pasos. Es decir, en esta red, para pasar de un nudo a otro a través de hilos, solo tenemos que dar un promedio de unos cuatro saltos. Esta propiedad, común a muchas redes, se conoce como «pequeño mundo» (*small world*).

Con el ejemplo anterior quedan meridianamente claros los conceptos de distancia media y de pequeño mundo en una red. Caldarelli y Catanzaro utilizan este recurso didáctico enseñándonos conceptos como concentrador (*hub*), distribución de conectividad, coeficiente de agrupamiento (*clustering*), asortatividad y disasortatividad, intermediación (*betweenness centrality*), comunidades o motivos, a partir de ejemplos de redes como el número de Erdös, experimentos como el famoso «seis grados de separación» de Stanley Milgram o estrategias de mercado como el márqueting viral de Hotmail.

Uno de los logros indiscutibles de esta nueva ciencia de las redes ha sido constatar, gracias a las grandes bases de datos ahora accesibles, que una inmensa cantidad de redes que describen sistemas de lo más variopinto poseen arquitecturas semejantes. En particular, presentan distribuciones de conectividad que se ajustan a leyes de potencia, son libres de escala. ¿Cómo resulta este patrón de conexionado a partir de procesos complejos no supervisados y tan dispares?

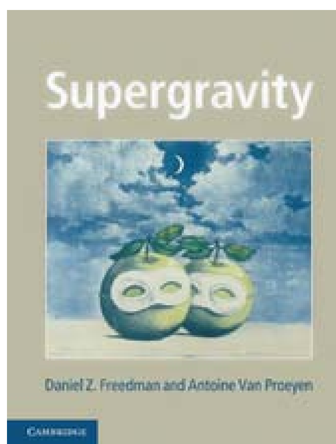
El primer mecanismo de crecimiento de abajo-arriba, propuesto por Albert-László Barabási y Réka Albert, fue el enlace preferencial, una variante de los modelos clásicos de Herbert A. Simon y George Udny Yule. Se trata de un mecanismo local del tipo «mientras más rico seas, más rico serás». Posteriormente, se propusieron más modelos que explicaran de manera sencilla formas distintas en que mecanismos locales, sin planificación global, pudieran generar estructuras ordenadas y eficientes a gran escala: duplicación y diversificación inspirados en redes genéticas, capacidad o aptitud de los nodos (variables ocultas) como puede ser el salario de los individuos que conforman una red social o el producto interior bruto de los países en la red de comercio mundial, el efecto que produce que la red esté inmersa en un espacio con distancias euclídeas, como ocurre con los suministros de gas o electricidad. O que

transcurran en el tiempo, como ocurre con las citas en publicaciones científicas.

Los últimos capítulos están dedicados a la importancia de la estructura de las redes frente a ataques al azar o dirigidos (qué efectos tiene la caída de servidores en Internet o estaciones eléctricas en la red de energía, por ejemplo), el efecto dominó (cómo se produce una cascada de extinciones en una red ecológica) y la dialéctica entre dinámica y estructura. Un resultado teórico antiintuitivo y sorprendente, respecto a este último punto, fue el obtenido por Romualdo Pastor-Satorras y Alessandro Vespignani sobre el contagio de virus informáticos a través de Internet. Estos físicos demostraron que al reescribir las ecuaciones epidemiológicas estándar suponiendo una distribución de contactos libres de escala puede desaparecer el clásico umbral epidémico y la infección puede persistir permanentemente.

Networks es el número 335 de la colección «Very Short Introductions» de Oxford University Press, que recuerda mucho en su formato e intención a la mítica «Que sais-je?» de Presses Universitaires de France. El libro, que pronto será traducido al castellano, acaba con la honestidad que se le supone a dos buenos investigadores y divulgadores: con una exposición sobre las limitaciones de la ciencia de las redes y las críticas recibidas por la asociación, a veces poco sustentada, entre redes libres de escala y autoorganización. A pesar de su escaso centenar de páginas y una docena de ilustraciones, este libro conseguirá colmar sin tecnicismos la curiosidad del público medio y, al mismo tiempo, introducir al futuro investigador en el fascinante mundo de las redes. Y si quieren más, pueden tirar de los hilos (enlaces) de la pequeña pero bien escogida bibliografía con que se cierra esta breve, y por tanto dos veces buena, obra.

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid



SUPERGRAVITY

Por Daniel Z. Freedman y Antoine Van Proeyen. Cambridge University Press; Cambridge, 2012.

¡Es la simetría, estúpido!

Física teórica fundamental

Algunos descubrimientos científicos fundamentales no tienen autor. Se trata de ideas que siempre han estado ahí y que la comunidad científica adopta y aprende a aplicar hasta convertirlas en piedras angulares de nuestro entendimiento de la realidad. El descubrimiento de la importancia de la simetría en la física fundamental es uno de los que ha calado más hondo, y es el tema principal de este libro.

Al morder la manzana del árbol de la simetría se nos abrieron los ojos a una nueva forma de ver el mundo; todas las leyes conocidas fueron reescritas de forma más elegante y, sobre todo, más esencial: encontrar una simetría es identificar una redundancia en la naturaleza (la imagen en el espejo frente al original) que podemos ignorar. Los principios de simetría nos llevaron a descubrir nuevas leyes como los huecos de la tabla periódica nos llevaron a descubrir nuevos elementos (el espejo nos dice dónde debe estar la imagen).

En la física fundamental, la simetría actúa como principio organizador y unificador: dos interacciones, partículas o conceptos están unificados cuando son diferentes manifestaciones de una única entidad, y suelen hallarse relacionados por una simetría fundamental de la naturaleza, como la masa y la energía, relacionadas por la simetría de la relatividad especial. Buscar unidad es buscar más simetría, y la supersimetría y la supergravedad son el epítome de esta.

Cada paso dado en el uso de la simetría ha marcado un hito en la historia de la evolución conceptual de la física teórica. Pensemos en la construcción de las relatividades especial y general basadas en principios de simetría espaciotemporales. Combinando la primera con la mecánica cuántica se obtienen las teorías que gobiernan las partículas elementales y sus interacciones: las teorías cuánticas de campos (relativistas), el marco del modelo estándar. La relatividad general describe la gravitación y el universo a gran escala y se combina mal con la mecánica cuántica: no existe una teoría cuántica de campos de la gravitación (el Santo Grial de la física teórica), pero la supergravedad tiene algo que decir al respecto.

Asimismo, cabe destacar la construcción de teorías basadas en principios de simetría de aforo (gauge), que actúan independientemente en cada punto del espaciotiempo. El modelo estándar corresponde a una teoría cuántica de campos relativistas con simetría gauge.

Y también el descubrimiento de que hay simetrías que no se manifiestan porque están espontáneamente rotas. La simetría que relaciona el electromagnetismo con la interacción nuclear débil está espontáneamente rota a través del famoso mecanismo de Brout, Englert y Higgs.

La mayoría de las teorías propuestas para superar el modelo estándar se basan en simetrías gauge mayores (como la supersimetría) rotas por generalizaciones del mecanismo de BEH. La supersimetría tiene carácter espaciotemporal y la máxima extensión posible de la relatividad especial, a la que transciende unificando los dos tipos de partículas diferentes que esta predice: los bosones y los fermiones. La supersimetría gauge lleva a una generalización supersimétrica de la relatividad general llamada supergravedad y obtenida por Freedman (uno de los autores del libro), Van Nieuwenhuizen y Ferrara, y Deser y Zumino en 1976 que se puede entender como la relatividad general con ciertos campos adicionales; una combinación muy interesante que ha sido tema de intenso estudio durante los últimos treinta años.

Además del altísimo grado de unificación que proponen —lo que excita los más elevados instintos de los físicos teóricos—, las teorías supersimétricas se combinan mejor con la mecánica cuántica; cuando se construyó la primera teoría de supergravedad se pensó que podría ser la versión cuantizable de la relatividad general que nos daría la teoría cuántica de la gravitación —pronto se vio que no—. Además, se pueden incluir las demás

interacciones: en 1983 Cremmer, Ferrara, Girardello, Van Proeyen (el segundo autor de nuestro libro) construyeron la supergravedad más general de este tipo (conocidas como $N = 1$).

A bajas energías las supercuerdas se comportan de manera efectiva como una supergravedad $N = 1$, lo que ha mantenido el interés por estas teorías. Si no son teorías consistentes de la gravedad cuántica es porque corresponden solo a versiones simplificadas de una teoría completa (supercuerdas) que sí lo es.

Se han construido supergravedades con más supersimetría (como la $N = 8$) y más simetría espaciotemporal (como la de 11 dimensiones) que desempeñan una función muy importante en las teorías efectivas de supercuerdas. Es en ellas donde se han identificado las famosas dualidades y la correspondencia AdS/CFT de Maldacena, que proporciona la primera realización concreta de las ideas de 't Hooft, Suskind y otros sobre la hipótesis holográfica de la gravedad cuántica. El grupo de Bern, Kosower y Dixon (premio JJ Sakurai de la APS 2014) ha demostrado que la teoría $N = 8$ se puede cuantizar consistentemente al menos hasta 4 bucles, lo que contradice —a ese nivel al menos— la afirmación genérica de que la relatividad general es irreconciliable con la mecánica cuántica.

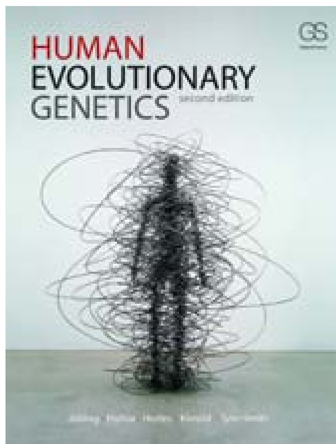
El libro que nos atañe llega, pues, en un momento muy propicio, y lo hace de la mano de dos grandes expertos, Daniel Z. Freedman (del Instituto de Tecnología de Massachusetts) y Antoine Van Proeyen (de la universidad belga KU Leuven), autores de algunos de los artículos fundacionales del campo y conocidos por su cuidado de los detalles y la fiabilidad de sus resultados. Es un libro dirigido a estudiantes de doctorado avanzados y a investigadores, que pretende ser pedagógico y también exhaustivo.

Los autores se acercan mucho a su objetivo, algo nada fácil en un campo de esta complejidad formal. Se cubren todos los temas fundamentales (superálgebras, representaciones, geometría) tras una introducción que bien podría utilizarse en un curso de teoría de campos y también, de forma extensa, las teorías $N = 1$ y $N = 2$ (siempre en 4 dimensiones) sin y con gravedad (supergravedades) utilizando una notación homogénea —un acierto que ha requerido un trabajo durísimo de los autores—. Estas teorías tienen muchas aplicaciones y no hay otro texto del que aprenderlas (salvo el clásico de Wess y Bagger para el caso $N = 1$).

Contiene un capítulo sobre la supergravedad en 11 dimensiones, cuya importancia hemos resaltado antes, otro sobre soluciones como los agujeros negros (y el mecanismo de atractores de estos) y otro sobre la correspondencia AdS/CFT (la primera discusión pedagógica que aparece en un libro de texto).

Un libro por ahora sin competidores y que está llamado a ser la obra de referencia en este campo durante mucho tiempo.

—Tomás Ortín
Instituto de Física Teórica, Madrid



HUMAN EVOLUTIONARY GENETICS

Por Mark Jobling, Edward Hollox, Matthew Hurles, Toomas Kivisild y Chris Tyler-Smith. Garland Science; Londres, 2013.

Genética humana

La evolución escrita en los genes

Las poblaciones humanas son entidades fluidas, que no dejan de recibir genes de grupos vecinos y transmitir, a su vez, genes propios. Los alelos entran en la población en diferentes momentos y desde distintos lugares. De los cinco autores de esta obra, cuatro son británicos; cada uno porta en su genoma más de 20.000 genes. Nuevas oleadas de genes arribaron con romanos, anglos, sajones, vikingos, normandos y otros viajeros. Resultaría vano esperar encontrar ahora un lugar biológico exclusivo de los británicos.

No menos errada va la hipótesis de un linaje único para un individuo. Como resultado de la reproducción sexual, a medida que vamos retrocediendo en el tiempo los individuos tienen un número siempre creciente de antepasados (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, etcétera). ¿De dónde son mis antepasados? De todas partes.

El registro de la vida se halla escrito en el genoma de las especies, que nos revela los procesos evolutivos y las relaciones que nos retrotraen al último antepasado común de todas las especies (LUCA, de *last universal common ancestor*). Para acotar este organismo ancestral tenemos que comparar las ramas más distantes en el árbol de la vida. El cotejo entre individuos estrechamente emparentados, así los de la misma especie, nos revela procesos evolutivos recientes. Las pruebas genéticas proceden de dos fuentes: los genomas de los individuos vivos y el ADN antiguo de restos orgánicos bien conservados.

Los rasgos fenotípicos de los humanos están controlados por una combinación de factores hereditarios y ambientales, así como por procesos estocásticos de desarrollo y moleculares. Los rasgos de análisis genético más fácil son los que se hallan determinados en buen medida por genes individuales (rasgos mendelianos). Sin embargo, en su mayoría los rasgos de mayor interés en antropología y medicina no son tan sencillos. Tales rasgos complejos están gobernados por interacciones entre múltiples genes y el entorno.

El registro histórico comprende textos escritos. De Mesopotamia proceden los más antiguos, fechados hace cuatro mil años (*La épica de Gilgamesh*). Aparecen en escritura cuneiforme. Otros escritos antiguos son todavía indescifrables, como la linear A cretense. El registro arqueológico de objetos creados por el hombre no se circunscribe a útiles, adornos o cerámicas. Comprende también suelos, vertederos, casas y paisajes. Los primeros útiles líticos datan de hace unos dos millones y medio de años. Por su parte, las lenguas habladas conservan trazas de sus orígenes a lo largo de miles de años. Hay en el planeta unas 6900 lenguas. Muchas pueden retrotraerse a un número reducido ancestral, denominado protolenguaje. Así, el inglés, francés, alemán, ruso y sánscrito pertenecen a la familia del indoeuropeo y comparten un lenguaje común inicial, el protoindoeuropeo. No se ha podido identificar una primera lengua común de todos los humanos. Para los lingüistas resulta problemático que un lenguaje pueda conservar claves

de su origen más allá de 10.000 años. Por fin, el registro paleontológico comprende restos fósiles de organismos o de sus huellas (ictitas). Se supone que los primeros fósiles datan de hace 3500 millones de años, una edad que indica que la vida apareció en la Tierra tan pronto se dieron las condiciones favorables.

Hay cuestiones sobre nuestro origen que no podemos abordar todavía y otras que quizá no podrán abordarse nunca. No podemos preguntar si el cruzamiento de dos especies contemporáneas de australopitecinos daba una progenie fértil o qué combinación de mutaciones bastaría para conceder a los chimpancés habilidades lingüísticas. Con todo, debemos contar con innovaciones técnicas inesperadas. Antes del advenimiento de los métodos de secuenciación de ADN fósil, la divergencia entre neandertales y humanos modernos resultaba incognoscible. Ahora contamos con una medida de esa divergencia, no solo de un gen, sino del genoma entero.

En febrero del año 2001 se anunció la secuenciación provisional del genoma humano, un recurso excepcional para identificar genes, comparar su evolución y la del genoma en su totalidad, así como para descubrir la variabilidad de la secuencia que pueda analizarse en estudios evolutivos y patológicos. Facilita también el análisis comparado con los genomas de otras especies y nos descubre la estructura y función de los cromosomas. Conviene advertir que la secuencia genómica no es completa y que, por tanto, puede inducir a confusión la idea de que exista un genoma único y arquetípico. Ello no obstante, la versión actual cubre el 99 por ciento de la parte que contiene los genes.

Los humanos, como la mayoría de los animales, somos diploides, es decir, poseemos dos copias del genoma en cada una de nuestras células somáticas. El genoma haploide del hombre (una copia) consta de unos 3200 millones de nucleótidos, los bloques fundamentales del ADN en cuyo interior se halla codificada la información. Pese a su importancia, los genes codificadores comprenden solo el 2 por ciento del genoma. Parte del restante 98 por ciento es esencial para producir moléculas de ARN que no se emplean nunca en la síntesis de proteínas, si bien son importantes para la regulación génica y para la función de los cromosomas [*véase* «La función reguladora del genoma», por R. R. Daga, S. Salas Pino y P. Gallardo Palomo, *en este mismo número*]. El número de genes en el genoma humano es una cuestión debatida. Las primeras hipótesis daban por cierto que los vertebrados presentarían un número de genes sustancialmente mayor que otros organismos, reflejo de su mayor complejidad biológica. Sin embargo, el primer borrador de la secuenciación revelaba que había solo 32.000 genes codificadores de proteína.

La naturaleza lineal del ADN significa que grandes genomas se corresponden con moléculas extremadamente largas. De tal magnitud es el tamaño del genoma haploide humano que, si fuere un dúplex de ADN y se extendiera mediría un metro de largo. Puesto que cada una de nuestras células somáticas contiene dos copias de ese genoma en su núcleo, de una decena escasa de micrómetros de diámetro, debe estar apretadamente empaquetado y, al propio tiempo, ser capaz de replicarse con fiabilidad y segregarse en la división celular; además, los genes han de mostrarse fácilmente accesibles para su expresión.

El material genético nuclear de las células somáticas del hombre se divide en 46 cromosomas, divididos a su vez en 23 pares, cada uno heredado de un progenitor. De esa cifra, 22 son autosomas, idénticos en ambos sexos. El par restante corresponde a los cromosomas sexuales. Las mujeres tienen dos copias del cromosoma X; los varones presentan un cromosoma X y un cromosoma Y. La división celular somática (mitosis) asegura, tras la replicación del ADN, la segregación ordenada de los cromosomas en células hijas genéticamente idénticas. La meiosis es una división especial de las células de la línea germinal que reduce a la mitad el número de cromosomas para dar gametos haploides y genéticamente únicos; comprende la recombinación, o intercambio de segmentos entre pares de cromosomas homólogos. La fecundación recrea el estado diploide y origina una combinación única de secuencias de ADN en un nuevo individuo. Las mitocondrias contienen su propio genoma circular, de unas 16,5 kilobases, que se heredan por vía materna y escapan a la recombinación.

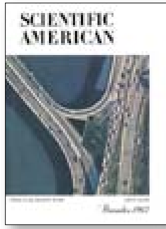
Las diferencias genéticas emergen por mutaciones en la línea germinal. Las sustituciones de bases y otras variantes son neutras para la selección, aunque la sustitución de una base por otra puede repercutir en una determinada función a través de la consiguiente sustitución de un aminoácido por otro, la introducción de codones de parada o cambios en la regulación. La mutación y la recombinación incrementan la diversidad humana mediante la generación de nuevos alelos y nuevos haplotipos, respectivamente. La deriva genética reduce la diversidad.

Las pruebas morfológicas procedentes de fósiles y de especies actuales sitúan a los humanos en el orden de los Primates, taxón surgido hace entre 80 y 50 millones de años, que incluye también a chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes. Los cariotipos de los humanos y grandes simios, aunque similares, difieren en aspectos importantes. El más notable es la reducción de 48 cromosomas a 46 como consecuencia de una fusión cromosómica en el linaje de los homininos. Las clasificaciones morfológicas tradicionales distinguían entre primates inferiores o prosimios (lémures, etcétera) y primates superiores o antropoides. Hace unos 7 millones de años, humanos y chimpancés compartieron su último antepasado común. La rama que condujo al hombre, iniciada por *Sahelanthropus tchadensis*, se caracterizó por un progreso hacia el bipedismo y un incremento subsiguiente del tamaño cerebral. Desde el punto de vista genético, los humanos difieren de los chimpancés en unos 35 millones de sustituciones nucleotídicas y en otros cinco millones de diferencias estructurales.

En esa trayectoria fueron emergiendo, hace entre 6 y 4 millones de años, *Orrorin, Ardipithecus*; entre 4 y 1 millón de años, con un porte grácil y robusto *Australopithecus*; hace 1,9 millones de años, el género *Homo* (*H. erectus*). Sale este de África y pone pie en Asia oriental hace 1,8 millones de años. Hace 1,0 millones de años entra en escena *Homo heidelbergensis*; hace 250.000 años, *Homo neanderthalensis*. De hace entre 220.000 y 120.000 años data el antepasado común más reciente de ADN mitocondrial actual. Hace 200.000 años debieron de iniciar su andadura los primeros humanos anatómicamente modernos. Hace 100.000 años vivían ya en el Levante los humanos anatómicamente modernos. Hace 42.000 años habitaban en Europa. Hace 28.000 años se extinguió el hombre del Neandertal. Hace 13.000 persistía en Indonesia *Homo floresiensis*. Hace 10.000 años comenzó la transición del Neolítico que dio origen a la agricultura y a la expansión demográfica; 6000 años después, primeras líneas mesopotámicas. La tesis actual más aceptada declara que el modelo fuera de África con mezclas arcaicas explica de forma convincente los datos fósiles, morfológicos, lingüísticos y genéticos.

—Luis Alonso

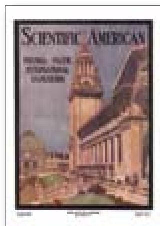
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Diciembre 1963

Descubrimiento de los cuásares

«A primeros de año unos astrónomos descubrieron que cinco objetos celestes, considerados hasta entonces como unas estrellas tenues y algo extrañas de nuestra galaxia, son quizá los cuerpos más extraordinarios y desconcertantes jamás observados con un telescopio. Muy distintas de las estrellas, se trata de unas potentísimas fuentes de radio y, según nuevas estimaciones sobre su emisión luminosa, quizá constituyan los objetos más brillantes del universo. La espectacular identificación de estos objetos fue resultado de una fructífera colaboración entre expertos en radioastronomía y astronomía óptica. Los primeros proporcionaron las posiciones precisas de cinco radiofuentes, las cuales fueron luego descritas como objetos parecidos a estrellas en placas fotográficas tomadas en los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar. En reconocimiento a su reducido tamaño, y a falta de un nombre mejor, se las ha denominado radiofuentes cuasi estelares.»



Diciembre 1913

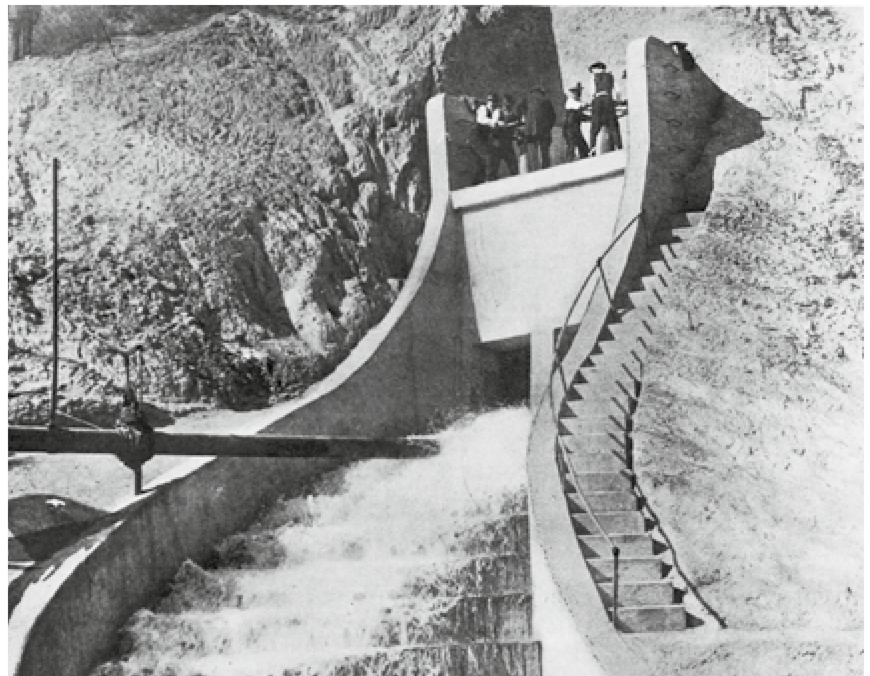
El fraude de Piltdown en EE.UU.

«Si la publicidad generalizada por parte de la prensa es una medida bastante precisa del interés que despierta un asunto, entonces la importancia y el espacio dispensados a mis recientes entrevistas sobre el tema del hombre prehistórico revelan algo más que una mera curiosidad del público. Me ha interesado también observar que casi todos los periódicos de distintos lugares del país que se han ocupado de la cuestión han destacado especialmente la declaración sobre la gran antigüedad del hombre en la Tierra. Se trata de uno de los aspectos cruciales del enigma del origen del hombre. Descubrimientos recientes han dejado claro que la raza humana lleva existiendo mucho más tiempo del que han estado suponiendo la mayoría de los científicos. —Dr. J. Leon William.»

El hombre de Piltdown fue un fósil de un supuesto humano primitivo descubierto en Inglaterra en 1912. El hallazgo fue declarado definitivamente un fraude en 1953. El doctor William, de profesión protésico dental, era un entusiasta, aunque ingenuo, antropólogo aficionado. En el número de Nature *(hoy publicación hermana de* Investigación y Ciencia*) del 22 de noviembre de 1923, un escéptico David Waterstone del Colegio King de Londres atribuía correctamente el cráneo a un humano moderno y la mandíbula a un simio.*

Agua para la ciudad

«El nuevo acueducto de Los Ángeles está diseñado para transportar al día algo más de mil millones de litros de agua a lo largo de una distancia superior a 375 kilómetros desde las sierras hasta Los Ángeles. El nuevo acueducto fue inaugurado y puesto en servicio el 5 de noviembre, y en nuestra portada de esta semana ofrecemos una imagen del momento en que se abren las compuertas y fluye el agua por la cascada formada debajo de la salida del túnel que atraviesa la cordillera de Santa Susana, 40 kilómetros al noroeste de la ciudad. La cascada cumple una doble función; por una parte se diseñó con un criterio estético, pero también con el fin de contribuir a purificar el agua con la aireación.»



SCIENTIFIC AMERICAN SUPLEMENT, VOL. LXXVI, N.º 1980, 13 DE DICIEMBRE DE 1913

AGUA PARA LOS ÁNGELES: Se pone en servicio el nuevo acueducto, 1913.



Diciembre 1863

La primera grabadora de sonido

«Hace unos meses, M. Scott [Édouard-Léon de Martinville] famoso entre los sabios de París, mostró unos experimentos de índole muy interesante acerca del arte de fijar [captar] sonidos. Merced a la construcción del *fonógrafo*, se consigue que unos medios naturales semejantes a los tan acertadamente empleados en fotografía se pongan al servicio de unos propósitos a la vista igualmente intricados para formar en este caso las vibraciones del aire [ondas sonoras] que componen el sonido. Sin embargo, una grave dificultad parece obstaculizar la reconversión de este lenguaje un tanto indefinido en los signos regulares y específicos de los sonidos verbales que lo produjeron.»

Este aparato, ahora llamado fonoautógrafo, solo podía registrar el sonido pero no reproducirlo.

Un consejo médico

«El más reciente remedio para el mareo es el hielo. Uno mejor, nos figuramos, es no hacerse a la mar.»

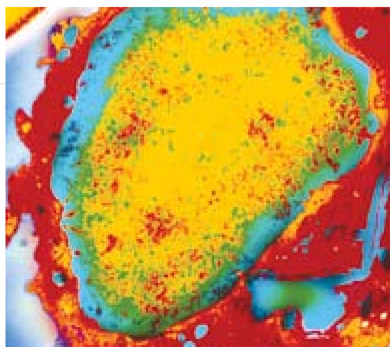


ASTRONOMÍA

Mundos con dos soles

William F. Welsh y Laurance R. Doyle

Los astrónomos están descubriendo planetas lejanos que orbitan alrededor de sistemas de dos estrellas.



MEDICINA

El largo camino hacia la comprensión del cáncer

George Johnson

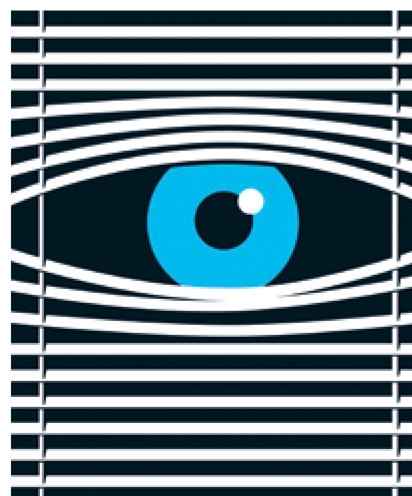
La biología de esta enfermedad está resultando ser más compleja de lo que se pensaba.

CLIMA

Una solución integral al carbono

Steven L. Bryant

¿Y si explotáramos enormes yacimientos de salmuera rica en metano emplazados bajo el océano y aprovecháramos la energía para reducir las emisiones de carbono?



INFORME ESPECIAL
LA ERA DE LOS MACRODATOS

Nuevas concepciones de la privacidad
Jaron Lanier

Una sociedad dirigida por datos
Alex «Sandy» Pentland

¿Está Google cambiando nuestra mente?
Daniel M. Wegner y Adrian F. Ward

Las memorias del futuro
Luca Perinola

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER,
MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Tomás Ortín: *Cómo oír la gran explosión*; Carlos Lorenzo: *La larga vida de los humanos*; Luis Bou: *Alteraciones nocturnas*, *La invención en una encrucijada*, *¿Quién financiará la próxima gran idea?*, *Una nueva vía global para la invención*, *Indicadores de innovación* y *¿Por qué México no rentabiliza su ciencia?*; J. Vilardell: *El coste oculto de las renovables*, *El nuevo imperio nuclear ruso*, *Curiosidades de la física* y *Hace...*; Laia Mestre: *El arte de construir un nido*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España